



**UNIVERSIDAD  
DE SALAMANCA**  
CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA**

**Grado en Ingeniería Civil**

**Trabajo Fin de Grado**

**Año académico 2014/2015**

**ESTUDIO DE LA PIEZOMETRÍA Y CALIDAD DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA PARA USO AGRÍCOLA Y DOMÉSTICO EN  
EL JARDÍN BOTÁNICO DE LA UNIVERSIDAD DE LISBOA**

**Autora**

**Laura Piedelobo Martín**

**Tutor**

**Dr. Pedro Huerta Hurtado**

**Co-tutora**

**Dra. Maria Catarina Rosalino da Silva**

**Ávila, Septiembre de 2015**

## ÍNDICE

RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
1. Introducción.....	6
2. Antecedentes.....	7
3. Objetivo del proyecto y plan de trabajo.....	8
4. Normativa y bibliografía de mayor interés .....	9
5. Memoria descriptiva .....	10
a. Encuadramiento geográfico.....	10
b. Encuadramiento geológico .....	13
c. Relieve.....	17
d. Hidrogeología.....	18
e. Climatología .....	20
6. Memoria constructiva .....	23
a. Análisis bibliográfico .....	23
b. Trabajos de campo .....	23
i. Localización de los piezómetros accesibles.....	23
ii. Parámetros medidos <i>in situ</i> .....	25
1. Temperatura.....	26
2. pH .....	27
3. Conductividad eléctrica .....	29
4. Piezometría .....	32
c. Análisis en laboratorio.....	35
i. Titulaciones .....	35
1. Determinación de la alcalinidad del agua .....	35
a. Anión bicarbonato .....	36
2. Determinación de la dureza del agua.....	37
3. Determinación del CO <sub>2</sub> libre del agua .....	41
ii. Espectrometría de absorción atómica (AAS).....	42
1. Catión potasio.....	45
2. Catión sodio.....	46
3. Catión calcio .....	47
4. Catión magnesio .....	48
iii. Cromatografía iónica (IC) .....	50
1. Cloruros .....	53
2. Fluoruros.....	55
3. Nitratos .....	56



4.	Sulfatos .....	57
iv.	Error de balance.....	59
7.	Análisis de los resultados.....	61
a.	Caracterización de la calidad del agua subterránea .....	61
i.	Software Aquachem .....	62
ii.	Clasificación del agua según el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff .....	63
iii.	Clasificación del agua según el diagrama de Piper.....	65
iv.	Clasificación del agua según los diagramas de Stiff.....	68
v.	Clasificación del agua según los valores patrón establecidos por los Decretos-Ley .....	70
	Calidad del agua para el riego .....	70
	Calidad del agua para consumo humano .....	72
b.	Caracterización de la piezometría. Identificación de variaciones eventuales y causas respectivas mediante la instalación de transductores de presión.....	73
c.	Potencial hidrogeológico del Jardín Botánico .....	74
8.	Conclusiones y alternativas .....	82
9.	Referencias bibliográficas.....	88
	ANEXOS.....	93
	ANEXO I.- Diagramas de Stiff para cada una de las muestras .....	94
	ANEXO II.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para consumo humano .....	95
	ANEXO III.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para su uso en el riego.....	96
	ANEXO IV.- Esquemas de la colocación de los transductores en los piezómetros S4 y S12.....	97
	ANEXO V.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica y niveles hidrostáticos desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S4 .....	98
	ANEXO VI.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica y niveles hidrostáticos desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S12 .....	99
	ANEXO VII.- Planta de localización de los perfiles geológicos interpretativos.....	100
	ANEXO VIII.- Perfiles geológicos interpretativos y representación de la superficie piezométrica ....	101

## RESUMEN

El presente estudio ha sido realizado en el ámbito de la asignatura Proyecto, perteneciente al cuarto curso del Grado en Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca. La localización del estudio se ubica en el Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa, Portugal. El principal objetivo del proyecto era la determinación de la calidad del agua para su uso en el riego del jardín y para consumo humano. Para ello, en los piezómetros existentes en el jardín, fueron medidos algunos parámetros *in situ* y fueron recogidas muestras de agua para su posterior análisis en laboratorio. De acuerdo con el Decreto-Ley N° 236/98, de 1 de Agosto – y teniendo en cuenta los apartados actualizados por el Decreto-Ley N° 243/01, de 5 de Septiembre y por el Decreto-Ley N° 306/07, de 27 de Agosto –, utilizados en Portugal para clasificar la aptitud del agua para los diferentes usos, se concluye que el agua es mayoritariamente de buena calidad para el riego, con excepción de aquellas plantas que no puedan soportar sus niveles de salinidad, pero de calidad media-baja para consumo humano. Además, con el fin de comprobar la gran dependencia entre la precipitación atmosférica y la variación del nivel del agua subterránea, fueron instalados transductores de presión en piezómetros seleccionados.

**Palabras Clave:** Jardín Botánico, Universidad de Lisboa, Calidad del Agua, Agua Subterránea, Riego, Consumo Humano.

## ABSTRACT

The current study has been performed for the course Project, which is mandatory in the fourth academic year of the Civil Engineering Degree at the Higher Polytechnic School of Ávila, University of Salamanca. The study was conducted at the Botanical Garden of the University of Lisbon, Portugal. The main goal of the project was to measure the quality of the groundwater with the purpose of using it for the watering service of the garden and for human consumption. In order to achieve that objective, some parameters were measured *in situ* and some water samples were taken for further lab analysis from the available piezometers in the garden. According to the Decree-Law 236/98 of August 1 – and considering the articles updated by the Decree-Law 243/01 of September 5 and by the Decree-Law 306/07 of August 27 –, used in Portugal for classifying water quality for several purposes, it is concluded that the quality of the water is mostly good for watering, with the exception of those plants that are not able to withstand its salinity levels, but low-to-medium quality for human consumption. Moreover, with a view to verifying the great dependence between the precipitation and the levels fluctuations of the groundwater, some pressure transducers were installed in selected piezometers.

**Key-Words:** Botanical Garden, University of Lisbon, Water Quality, Groundwater, Watering, Human Consumption.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a la Profesora Doctora Catarina Silva la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto y aprender de ella y al Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lisboa por permitirme realizarlo dándome acceso a todos los equipos necesarios.

A mis padres, por aguantarme cuando me pongo cabezona, saber orientarme y aportarme toda su confianza. Y, por supuesto, al resto de mi familia, mis abuelos, tíos, primos,... por toda la seguridad en mí misma que siempre están dispuestos a aportarme.

A todos mis profesores, tanto de la Escuela Politécnica de Ávila como de la Universidad de Lisboa, por todo lo que he aprendido gracias a ellos tanto profesional como personalmente y especialmente al Profesor Antonio Brum por toda su ayuda para la realización de los mapas de encuadramientos en este proyecto, sin el cual probablemente el programa Arcgis me habría vuelto loca y al Profesor Doctor Pedro Huerta por todas las facilidades que me ha proporcionado para que este proyecto sea una realidad.

A todos mis compañeros y amigos de la Universidad, sobre todo a Miriam Blázquez y a Lucía Alonso, porque sin ellas, su ayuda, sus consejos, sus resúmenes, las largas noches estudiando y su confianza en mí probablemente no estaría ahora escribiendo esto.

Especialmente, quería agradecer todo esto a una pequeña pero grandísima persona que, aunque sólo la conozco desde hace un año, parece que fuese de toda la vida, mi peque portuguesa Beatriz Vidal. Por todo lo que me ha tenido que aguantar este año, desde momentos de total agobio y tristeza a instantes de pura felicidad. Por haber estado siempre a mi lado e intentar ayudarme con absolutamente todo lo que he necesitado, aunque no tuviese la más mínima idea de lo que quería hacer. Por haberse convertido en una parte totalmente imprescindible en mi vida, porque el término “amiga” se queda corto para ella. Muchas gracias.

## 1. Introducción

El agua subterránea es de esencial importancia en la actualidad, ya que permite solucionar los problemas relevantes de abastecimiento relacionados con la escasez de agua y satisfacer gran parte de las necesidades.

A nivel mundial, el regadío es el mayor extractor y consumidor de los recursos hídricos existentes – aproximadamente un 80% del total de los recursos hídricos disponibles. Este hecho hace que una buena interacción entre el uso del agua superficial y los recursos hídricos subterráneos (utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos existentes) promueva una gestión sostenible tanto de las tierras como del agua total disponible. Un uso correcto de las reservas de agua subterránea puede permitir tanto la mitigación de los problemas de sequía como la adaptación al cambio climático (Balairón, L., 2010).

El Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa (Portugal), situado en el número 58 de la Rua da Escola Politécnica, es un jardín científico proyectado a mediados del siglo XIX e inaugurado en 1878. En él están referenciadas cerca de 1500 especies distintas y más de 100000 ejemplares, los cuales necesitan de enormes cantidades de agua para su supervivencia (MUHNAC, 2013). Con el objetivo de reducir los costes en regadío de la Universidad de Lisboa, resulta primordial verificar si el agua subterránea dispone de calidad suficiente para ser utilizada con este fin.

La calidad del agua para regadío afecta tanto a los rendimientos de las plantas como a las condiciones físicas del suelo. Por este motivo, el agua subterránea debe cumplir una serie de propiedades físicas, químicas, bacteriológicas y biológicas y alcanzar o superar una serie de niveles de calidad determinados por cada país para poder ser utilizada en el riego (Balairón, L., 2010).

El uso agrícola del agua no es el más exigente en lo que a calidad del recurso se refiere, siendo las características químicas del agua de regadío las que afectan principalmente al rendimiento de la misma. Los principales aspectos que hay que estudiar en un agua para ver su aptitud para ser usada en un regadío son los siguientes: contenido total de sales (salinidad), infiltración y toxicidad de ciertos iones (Balairón, L., 2010).

Por tanto, el primer paso a dar en este tipo de estudios es la realización de un análisis físico-químico del agua a emplear que determine: las concentraciones de sales – cationes, aniones y parámetros derivados de la composición de sales, como la conductividad eléctrica, sólidos en solución y resistividad –, nutrientes – nitratos, fosfatos y potasio – y otros parámetros específicos – boro, acidez o basicidad (pH) y relación de adsorción de sodio (SAR) (Balairón, L., 2011).

## 2. Antecedentes

El Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa fue diseñado a mediados del siglo XIX como jardín científico y tiene una extensión de aproximadamente 4 hectáreas.

En 2011, la Rectoría de la Universidad de Lisboa (RUL) contrató a la empresa Grandewater (especializada en estudios de hidrogeología aplicada) para elaborar la caracterización hidrogeológica y geotécnica de este jardín. La empresa Geotest fue subcontratada para proceder a la perforación e instalación de los piezómetros necesarios para el estudio.

El trabajo ejecutado por Geotest tuvo los principales objetivos de responder a la pregunta cuestionada por el Artículo 27º del PUALZE (Plan de Urbanización de la Avenida da Liberdade y Zona Envolvente, publicado en la 2ª Serie del Diário da República – Aviso nº 15285/2009 de 9 de Septiembre) el cual *“condiciona la construcción de infraestructuras subterráneas a la presentación de un estudio hidrogeológico acreditativo de que la solución propuesta es viable y no afecta al sistema de drenaje natural existente”* y de complementar el Estudio Geológico y Geotécnico realizado en el área de intervención urbanística prevista para la zona de Príncipe Real y Rua da Alegria por Geotest en 2010 (Geotest, 2011).

Por otro lado, el objetivo principal de la RUL era reconocer las interferencias eventuales en el circuito subterráneo del agua como resultado de la aplicación del Plan Pormenorizado del Parque Mayer, Jardín Botánico y Edificios de la Rua da Escola Politécnica y evaluar las condiciones de cimentación en la zona del antiguo Picadero, adscrito al Jardín, con la perspectiva de proyectar un parking de estacionamiento subterráneo. De manera complementaria, se procedió a la evaluación del potencial hidrogeológico del local (Silva, M.C.R. y Medeiros, A., 2011).

Teniendo como base estos estudios, en el presente año 2015 se pretende llevar a cabo un proyecto más específico, basado principalmente en el estudio de la calidad del agua subterránea, tanto para su uso en el riego como para consumo humano, y en la relación entre la piezometría y la precipitación atmosférica, utilizando para ello los piezómetros instalados por la empresa Geotest para monitorizar el nivel y recoger muestras del agua subterránea.

### 3. Objetivo del proyecto y plan de trabajo

Tal como se ha explicado anteriormente, los principales objetivos del presente estudio serán:

- Caracterizar la calidad del agua subterránea, teniendo como principal finalidad el riego del jardín. De manera complementaria se evaluará también su aptitud para consumo humano.
- Interpretar la piezometría, identificando sus principales variaciones y las respectivas causas.

Para conseguir los objetivos mencionados se realizará, en primer lugar, un análisis bibliográfico de: a) la legislación portuguesa relativa a las características que debe cumplir el agua subterránea para poder ser utilizada en los diferentes usos; b) los informes de los estudios llevados a cabo por las empresas Grandewater y Geotest a pedido de la RUL (análisis de los sondeos, estudio hidrogeológico y otra información pertinente) y c) otros trabajos relevantes, principalmente la Noticia Explicativa de la 2ª edición de la hoja 34-D (Lisboa) de la Carta Geológica de Portugal en la escala 1:50.000, publicada en 2006.


Posteriormente, se realizarán trabajos de campo con la finalidad de medir la profundidad del nivel del agua subterránea, recoger muestras de la misma, medir los principales parámetros físico-químicos *in situ* (conductividad eléctrica, pH y temperatura) e instalar dos transductores de presión.

En laboratorio se trabajará con las muestras de agua recogidas para analizarlas químicamente, evaluando: a) su grado de dureza, alcalinidad y concentración de CO<sub>2</sub>, utilizando titulaciones potenciométricas; b) especies aniónicas mayores, utilizando cromatografía iónica (IC) y c) especies catiónicas mayores, utilizando espectrometría de absorción atómica (AAS).

Por último, se procederá a la interpretación de todos los datos obtenidos con la principal finalidad de evaluar si la cantidad y calidad del agua subterránea disponible en el Jardín Botánico es adecuada para su utilización en el riego del mismo.

Las diferentes tareas realizadas y correspondientes períodos de duración quedan reflejados en el siguiente cronograma.

Tabla 1.-Cronograma del proyecto. Orden y duración de las actividades realizadas durante la ejecución del proyecto.

 <b>Ciências ULisboa</b> <small>Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa</small>		CRONOGRAMA DEL PROYECTO					
NOMBRE DEL PROYECTO		ESTUDIO DE LA PIEZOMETRÍA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA USO AGRÍCOLA Y DOMÉSTICO EN EL JARDÍN BOTÁNICO DE LA UNIVERSIDAD DE LISBOA					
DURACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO EN MESES		6 MESES. DE 02/15 A 07/15					
Nº	ACTIVIDAD	MES					
		Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
1	Análisis bibliográfico (normativa portuguesa e informes mencionados en el punto 4)						
2	Encuadramientos geográfico, geológico, geomorfológico, hidrogeológico y climatológico						
3	Inventario de piezómetros y recogida de muestras						
4	Medición de parámetros <i>in situ</i> (pH, temperatura y conductividad eléctrica)						
5	Colocación de los transductores						
6	Determinación de la alcalinidad del agua						
7	Determinación de la dureza del agua						
8	Determinación del CO <sub>2</sub> libre del agua						
9	Recogida de los transductores						
10	Espectrometría de absorción atómica						
11	Cromatografía iónica						
12	Análisis de los resultados obtenidos						
13	Redacción del documento final						

#### 4. Normativa y bibliografía de mayor interés

De las principales normativas y elementos bibliográficos disponibles con interés para el presente estudio se refieren los siguientes:

- Informe de Geotest, Grandewater: “Limiasur, S.A. Príncipe Real e Rua da Alegria (Lisboa). Estudo Hidrogeológico. Relatório Final 2011/01/28/01”;
- Informe de la Rectoría de la Universidad de Lisboa, Grandewater: “Caracterização Hidrogeológica do Jardim Botânico da Universidade de Lisboa. Relatório Final 2011/07/11/01”;
- Ministério do Ambiente, Decreto-Ley Nº 236/98, de 1 de Agosto, Diário da República – I Série-A, Nº 176, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, Lisboa, que establece las normas, criterios y objetivos de calidad del agua para los diferentes usos, mediante el establecimiento de valores máximos recomendables y admisibles; parcialmente revocado por el Decreto-Ley Nº 243/01, de 5 de Septiembre, Diário da República – I Série-A, Nº 206 – y por el Decreto-Ley Nº 306/07, de 27 de Agosto, Diário da República – I Série, Nº 164.

## 5. Memoria descriptiva

### a. Encuadramiento geográfico

El Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa (JBUL), creado en el año 1873 e inaugurado en 1878, surgió por la necesidad de crear un complemento práctico en la enseñanza e investigación de la botánica en la entonces Escuela Politécnica de Lisboa, encontrándose aún en el corazón del jardín el observatorio astronómico, único observatorio de enseñanza del siglo XIX existente en Portugal. Posee actualmente cerca de 4 hectáreas de extensión y es el único de su género en el país clasificado como Monumento Nacional (Soares, M., 2014). Se localiza en el barrio de Santo Antonio, Avenidas Novas, Lisboa, y su administración es estatal (MUHNAC, 2013).

Más detalladamente, el Jardín se sitúa en la zona de Príncipe Real, siendo confinado al Sur por la Rua da Escola Politécnica, al Oeste por los edificios contiguos a la Rua Nova de São Mamede, al Norte por los edificios adyacentes a la Rua do Salitre, incluyendo el Parque Mayer, y al Este por los edificios existentes en el entorno de la Rua da Alegria (Silva, M.C.R. y Medeiros, A., 2011). La localización esquemática del área donde se desarrollaron los trabajos se encuentra señalada en las figuras 1 y 2.



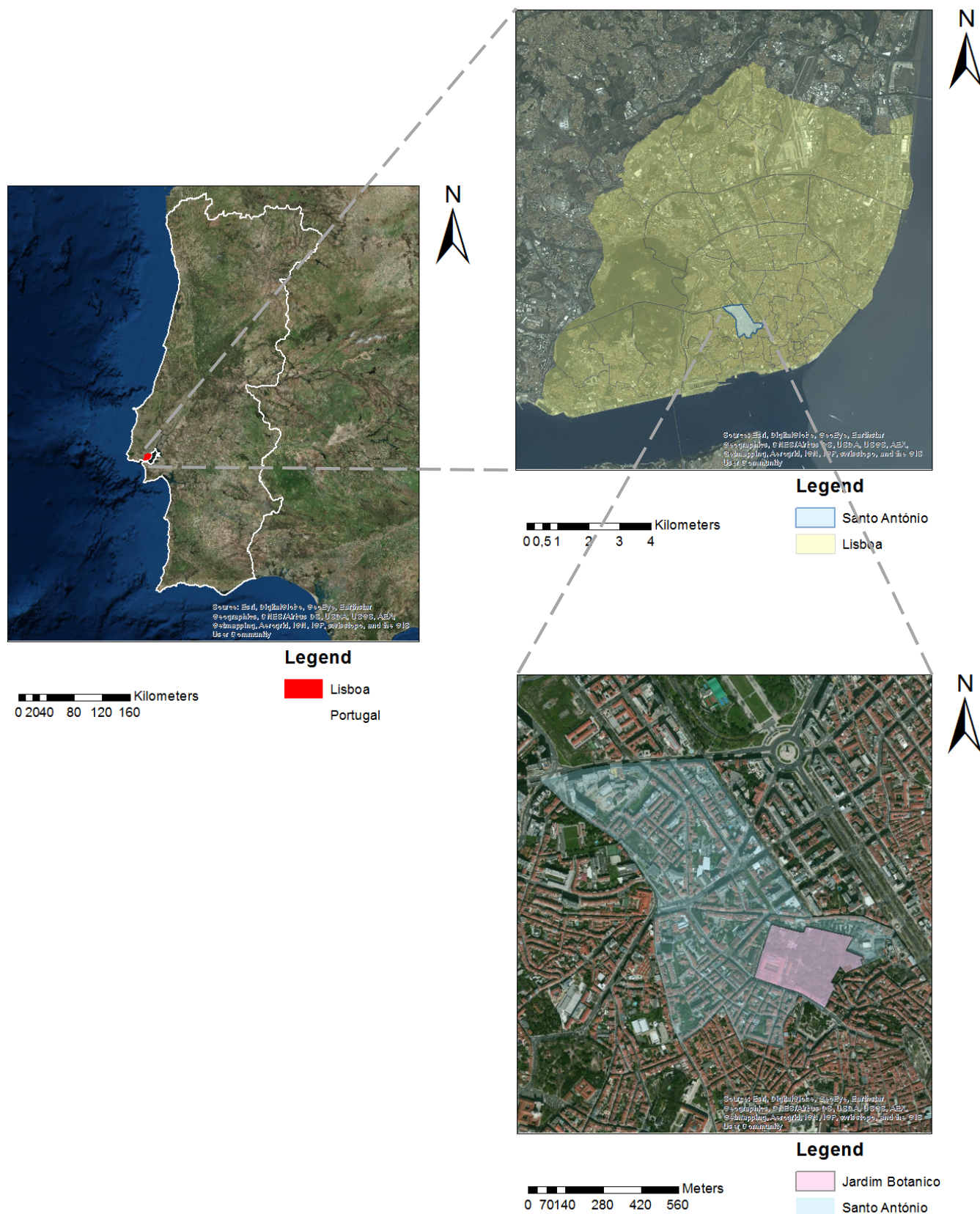


Figura 1.- Localización geográfica del área objeto de estudio dentro de la ciudad de Lisboa, Portugal (Adaptada de ArcGis, 2015).

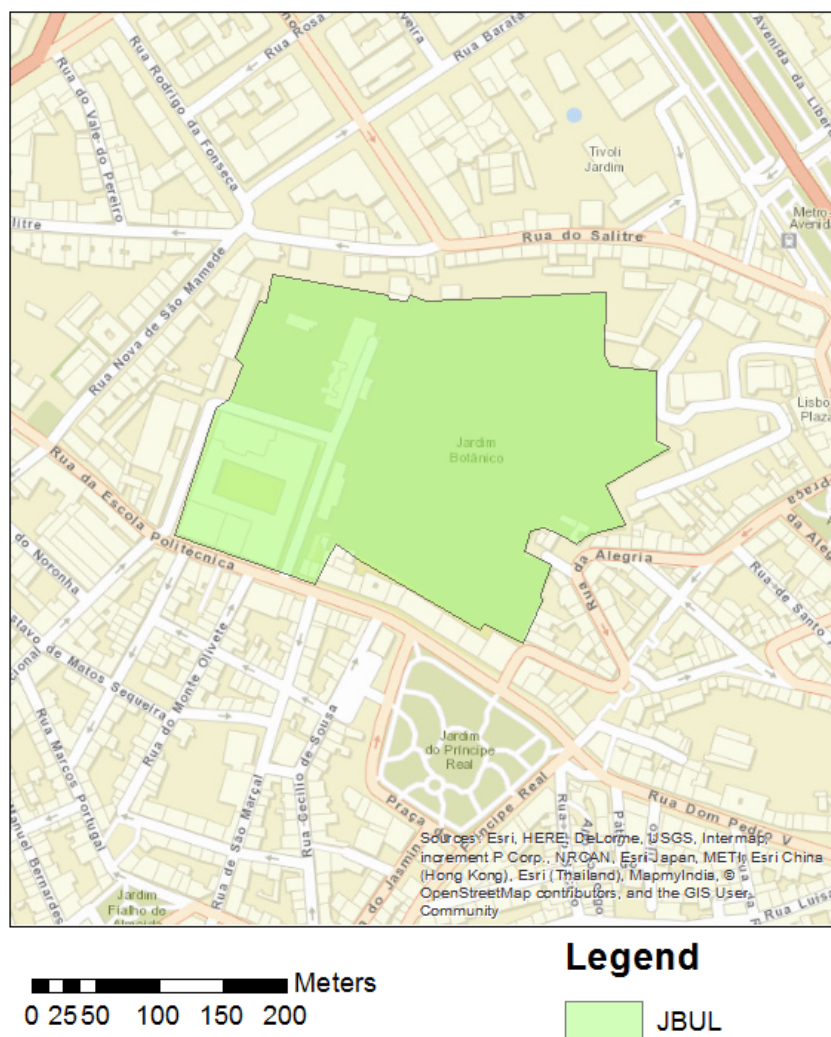


Figura 2.- Localización geográfica más detallada del área objeto de estudio, Jardim Botânico de la Universidad de Lisboa (JBUL) (Adaptada de ArcGis, 2015).

## **b. Encuadramiento geológico**

El encuadramiento geológico del presente estudio se basa en el capítulo Caracterización Geológica desarrollado en el Informe Geológico y Geotécnico de la empresa Geotest en el año 2011 y en la Noticia Explicativa de la 2ª edición de la hoja 34-D (Lisboa) de la Carta Geológica de Portugal en la escala 1:50.000, publicada en 2006. Esta edición de la Carta de Lisboa está basada en la 1ª edición de la hoja 4 de la Carta Geológica del Municipio de Lisboa, publicada en 1986 y en la escala 1:10.000 por los Servicios Geológicos de Portugal sobre la coordinación de Fernando Moitinho de Almeida y de la cual se obtiene la figura de caracterización geológica de la zona de estudio (Fig. 4); en la primera Carta Geológica de Lisboa, publicada en 1940 y en la escala 1:20.000 por los Servicios Geológicos de Portugal sobre la coordinación de Romão de Matos, basándose en los levantamientos de P. Choffat para el Cretácico y de J.C. Berkeley Cotter para el Micénico; en el esquema del Complejo Basáltico de Lisboa de G. Zbyszewski (1952); en la Carta Geológica del Complejo Volcánico de Lisboa (1978) y en nuevos levantamientos de J. Pais (Universidad Nova de Lisboa).

De acuerdo con la Carta Geológica del Municipio de Lisboa (1986), en la zona de estudio se dan las formaciones del Micénico marino de Lisboa, habitualmente designadas como "arcillas y calcáreos de los Prazeres" ( $M_I^1$ ), pertenecientes al Aquitaniano (Micénico inferior) y actualmente denominadas como "capa de los Prazeres" (Pais. J. et al, 2006). Al Sur del área de estudio, también se puede observar la deposición sobre estas formaciones de las tradicionalmente denominadas como "aréolas de la Estefânia" ( $M_{II}^1$ ) (Fig. 4).

De manera general, sobre todas estas formaciones micénicas existe una cobertura superficial de deposición reciente, naturaleza heterogénea, esencialmente constituida por arcillas, arenas arcillosas o margosas, fragmentos líticos y restos cerámicos y con un espesor variable entre 3 y 7,5 m, resultante principalmente de la intensa ocupación antrópica. Las "arcillas y calcáreos de los Prazeres" se encuentran también a veces recubiertos por depósitos resultantes de movimientos de vertiente producidos a lo largo del tiempo (Geotest, 2011).

### **Arcillas y calcáreos de los Prazeres ( $M_I^1$ )**

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, estas formaciones afloran únicamente en el área de Lisboa, extendiéndose desde Carnide hasta Santos, pasando por Benfica, Palma de Baixo, Campo Pequeno, Plaza del Marqués de Pombal, Largo do Rato, Prazeres, Estrela y Lapa. Más al Oeste también afloran junto al Fuerte del Alto del Duque y Algés.



Se caracterizan por arcillas, arcillas limosas, arenas finas arcillosas, arcillas margosas y margas, con concreciones carbonatadas, formando núcleos de elevada resistencia. Se dan también intercalaciones de niveles calcáreos, arenosos o margosos, de aspecto blanquecino y de manera general con pequeño espesor. En la base de este complejo aparecen, frecuentemente, intrusiones de estratos carbónicos con abundante materia orgánica vegetal. El espesor total de este conjunto es del orden de 30-35 m en la región de Lisboa. Sin embargo, se verifican variaciones importantes dependiendo de la localización, pudiendo alcanzar espesores del orden de los 70 m, como pueden probar los sondeos realizados para el puente 25 de Abril sobre el río Tajo (Pais, J. et al, 2006).

### Aréolas de la Estefânia ( $M_{II}^1$ )

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, afloran en la región de Lisboa, desde Carnide hasta Baixa, pasando por Telheiras, Campo Pequeno, Campo de Santana, Bairro Alto y la base de la colina del Castillo de São Jorge. Además, existen deposiciones aisladas en las zonas de Benfica y Algés.

Están constituidas por arenas finas, limosas, micáceas (aréolas), de colores vivos, y por arcillas limoarenosas, generalmente de tonos amarillentos o blanquecinos. Frecuentemente se intercalan niveles de arenisca calcárea de granulometría predominante media a fina, a veces fosilíferos, lumachélicos, con distribución errática, de espesor métrico, más o menos consolidados y que dominan la parte alta de esta unidad geológica (Pais, J. et al, 2006).

Esta unidad puede ser dividida, desde su base hasta el techo en tres niveles diferentes: arenas y areniscas arcillosas con *Ostrea aginensis* y restos de vegetales; arenas arcillosas finas, micáceas (aréolas) de colores vivos con *Pecten pseudo-pandorae* y arenisca calcárea fosilífera de color predominantemente grisáceo verdoso. Corresponden a una única secuencia deposicional y la discontinuidad situada en la base del conjunto data de 21 millones de años. El espesor total varía entre los 24 y los 36 m, presentando la zona inferior cerca de 8 a 20 m de espesor, la zona intermedia entre 3 y 14 m y la zona superior sin exceder generalmente los 4 m (Pais, J. et al, 2006). Las arenas no forman una unidad regular, sino formas lenticulares intercaladas en las arcillas (Geotest, 2011).

Tal como se puede observar en el corte geológico A-B (Fig. 5), la formación de “aréolas de la Estefânia” está depositada sobre la anteriormente explicada de “arcillas y calcáreos de los Prazeres”. Ambas pertenecen al Aquitaniano (Micénico inferior) y presentan una disposición tabular, inclinando hacia el SE-SSE, con baja pendiente, del orden de 5 a 12°.

La cartografía geológica de las unidades descritas se puede observar en las siguientes figuras 3, 4 y 5.

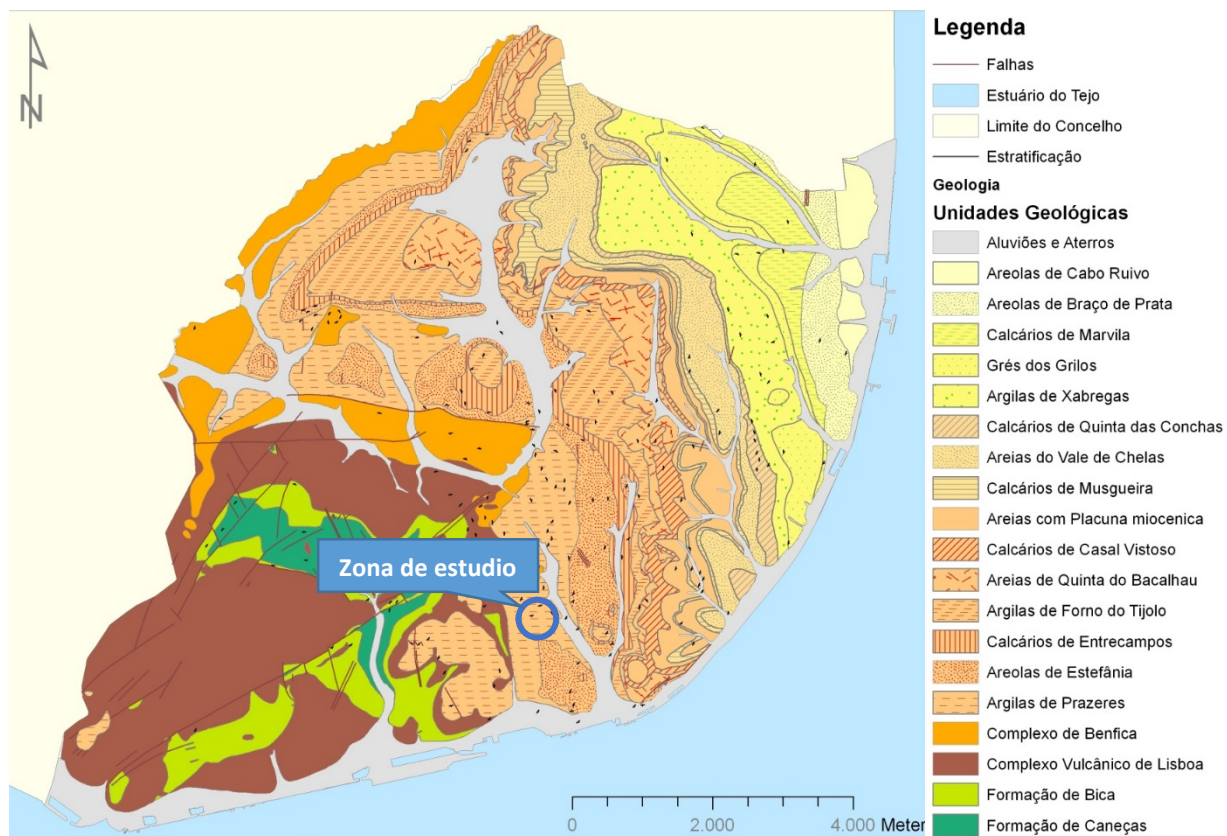


Figura 3.- Caracterización geológica del Municipio de Lisboa y localización del área de estudio (Adaptada de Câmara Municipal de Lisboa, 2009).

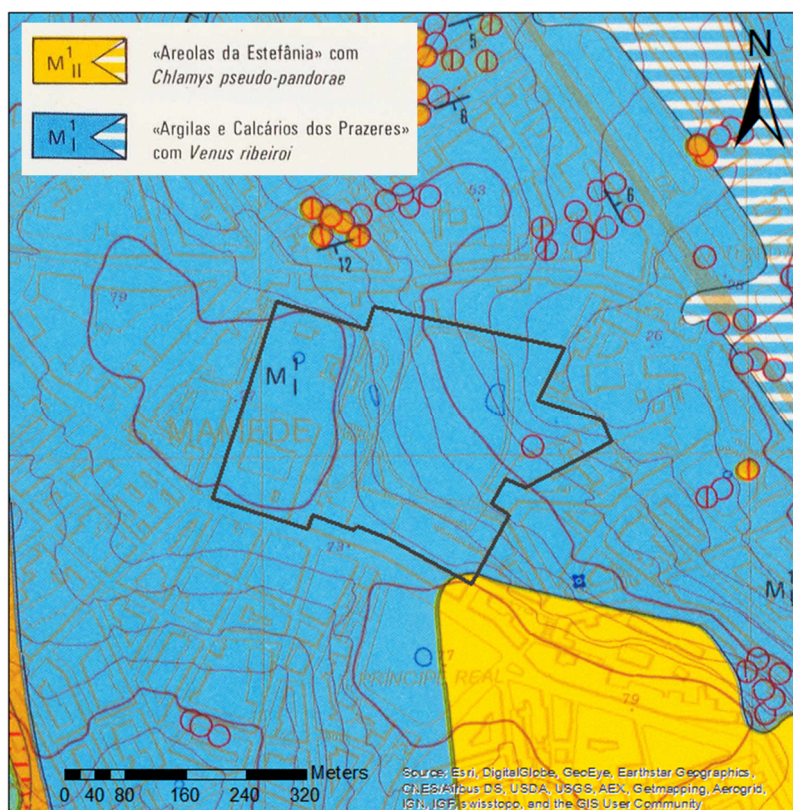


Figura 4.- Caracterización geológica de la zona de estudio (Adaptada de la Primera Edición de la Hoja 4 de la Carta Geológica del Municipio de Lisboa a escala 1:10.000, 1986).



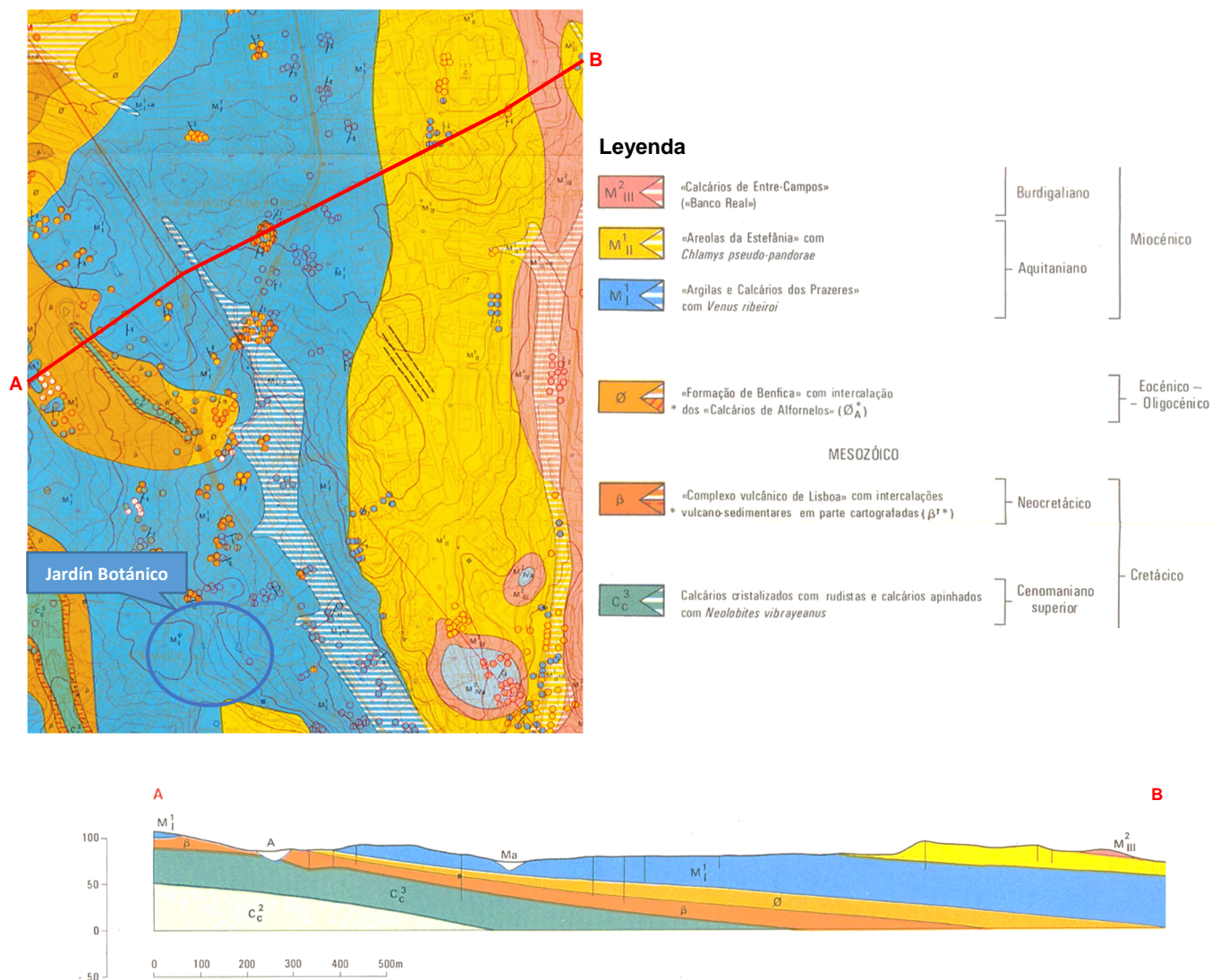


Figura 5.- Corte geológico A-B para posibilitar la localización y caracterización geológica pormenorizada de la zona de estudio (Adaptada de la Primera Edición de la Hoja 4 de la Carta Geológica del Municipio de Lisboa a escala 1:10.000, 1986).

### c. Relieve

La topografía del terreno constituye una de las principales variables a tener en cuenta durante el proceso de elección del sistema de riego a emplear para que éste se desarrolle de un modo eficaz, intentando evitar principalmente los problemas de bajo aprovechamiento del agua provocados por su acumulación e infiltración en el terreno. La topografía juega a favor del riego a presión ya que, para evitar los problemas mencionados, el riego por gravedad requiere terrenos con pendientes uniformes, excluyendo en general las pendientes pronunciadas, siendo lo normal valores máximos de un 8-10%. Por ello, en los riegos por gravedad se requieren casi siempre importantes nivelaciones del terreno, lo que puede llegar a ser muy costoso. Por el contrario, los riegos a presión se adaptan mejor a la topografía natural del terreno (Balairón, L., 2010).

La zona de estudio presenta un relieve accidentado e irregular (Fig. 6), con vertientes marcadas por fuertes declives (Fig. 7) correspondientes a grandes variaciones de altitud, resultado de la evolución geomorfológica natural de la región, relacionada con el encaje de los principales afluentes del río Tajo.

Más concretamente, el área estudiada se encuentra situada en una de las zonas más elevadas de Lisboa, con una elevación acotada aproximadamente entre los 20 m sobre el nivel del mar al Este y los 100 m al Oeste (Fig. 6), entre los barrios de Príncipe Real y São Mamede, aproximadamente al SW de la Avenida da Liberdade.

Además, como se puede observar en la figura 7, la zona de estudio presenta grandes variaciones de pendientes, cuyos valores varían desde 0-3% en el área occidental del Jardín Botánico hasta 6-18% o incluso mayor a 18% en el área oriental.

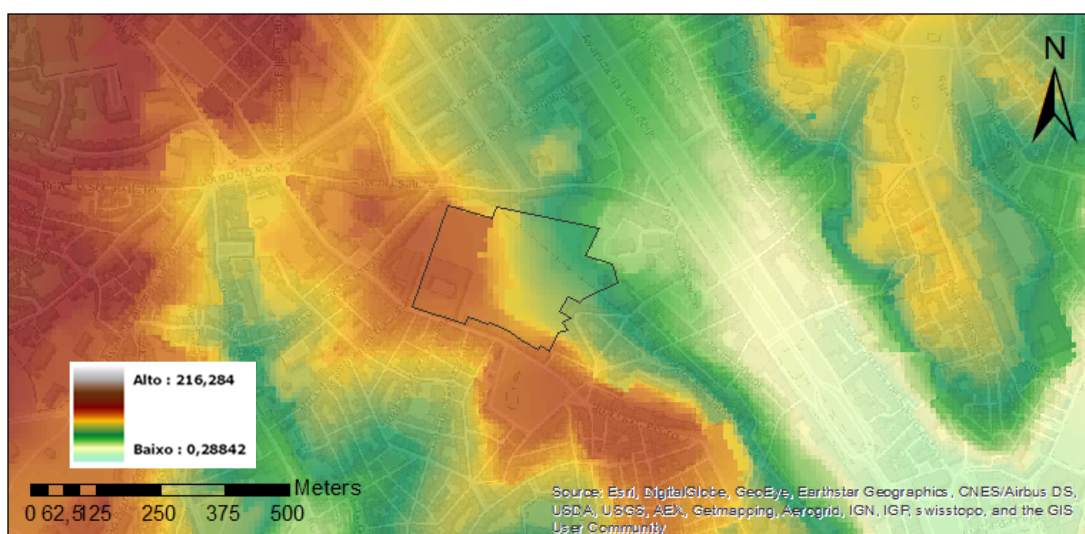


Figura 6.- Modelo Digital del Terreno en la zona de estudio (Adaptado de Cámara Municipal de Lisboa, 2015).

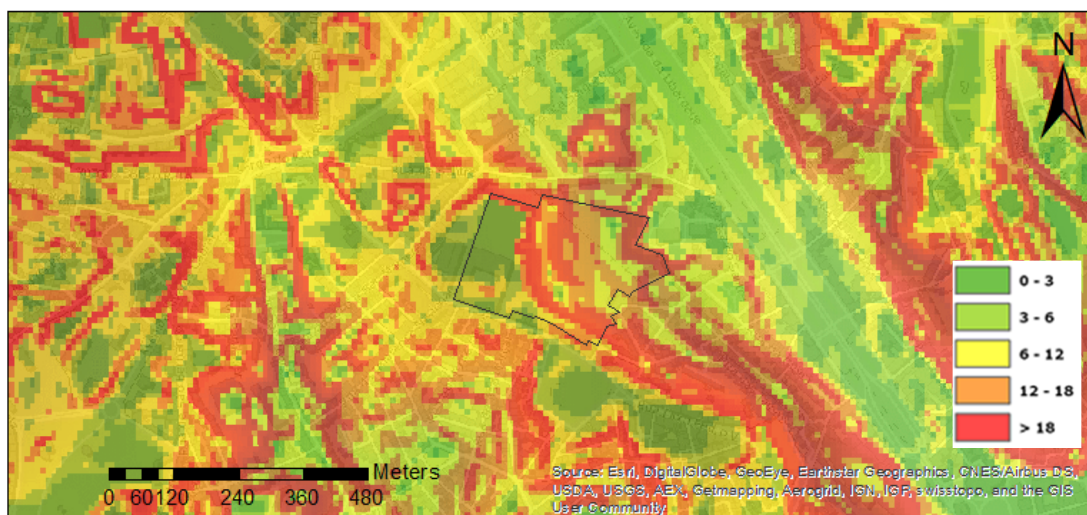


Figura 7.- Caracterización de variación de pendientes en la zona de estudio (Adaptado de Câmara Municipal de Lisboa, 2015).

#### d. Hidrogeología

Las condiciones hidrogeológicas de una zona dependen principalmente de la naturaleza litológica de los materiales, estructura geológica y condiciones de fracturación y alteración que caracterizan los macizos rocosos existentes.

En relación con los depósitos de cobertura superficial, la conductividad hidráulica depende tanto del porcentaje de finos como de la granulometría y naturaleza de los materiales existentes. En la zona de estudio, los depósitos superficiales presentan una componente predominante areno-arcillosa y, por tanto, una conductividad hidráulica del tipo baja-media (Fig. 8) que variará en función del porcentaje de la fracción arenosa y/o elementos líticos existentes. Podrán surgir niveles de agua suspendidos, confinados o semiconfinados y de bajo caudal cuando se dé la existencia puntual de niveles principalmente arenosos intercalados (Geotest, 2011).

Por otro lado, las formaciones pertenecientes a la unidad geológica “capa de los Prazeres”, debido a la predominancia de la componente arcillosa y arcillo-margosa, actúan desde el punto de vista hidrológico como un macizo poco permeable (Fig. 8). Sin embargo, estas formaciones pueden contener intercalaciones de carácter más arenoso entre estratos de baja permeabilidad, las cuales pueden dar origen a niveles de agua suspendidos, aunque generalmente poco productivos debido a la baja permeabilidad. La presencia de agua en estas formaciones podrá también estar relacionada con la fisuración del macizo, enfatizando caudales débiles. Además, esta unidad geológica incluye intercalaciones de calizas con arenisca o margosas entre estratos de baja permeabilidad, donde se dará la circulación del agua a lo largo de las superficies de discontinuidad (permeabilidad secundaria), pudiendo dar origen a niveles de agua suspendidos semiconfinados (Pais, J. et al, 2006).



De esta forma, la permeabilidad de los macizos rocosos en cuestión dependerá de su estado de fracturación, de las características geométricas de las fracturas (orientación, espaciamiento y continuidad) y del tipo de material de relleno.

Como se verá más adelante, la componente arcillosa y arcillo-margosa de la unidad geológica “capa de los Prazeres” se traducirá en valores bajos de conductividad hidráulica.

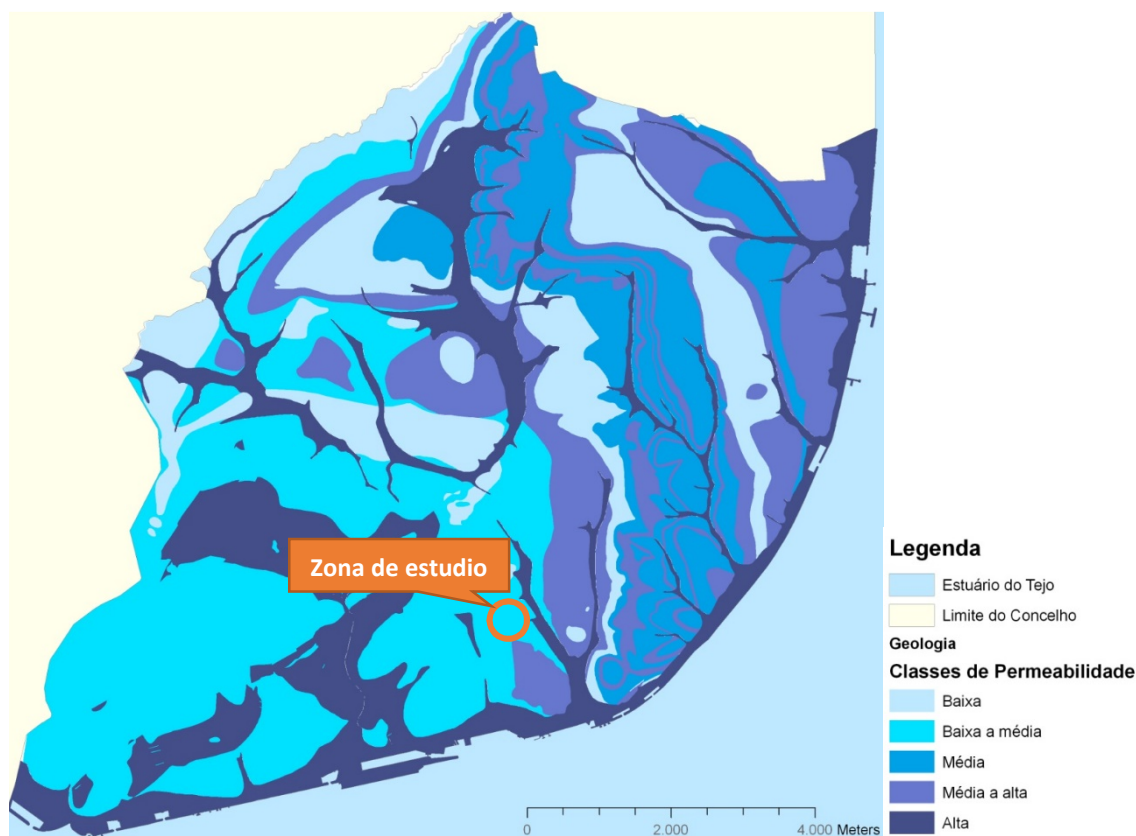


Figura 8.- Caracterización de la permeabilidad en el Municipio de Lisboa y localización de la zona de estudio. Las zonas de máxima infiltración se corresponderán con las de mayor permeabilidad (zonas de permeabilidad media a alta y alta) (Adaptado de Câmara Municipal de Lisboa, 2009).

## e. Climatología

Para la elaboración del estudio climatológico fueron consultados los valores ofrecidos por la estación pluviométrica del Jardín Botánico durante el período de 2011-2015 (Valente, M.A., 2015), la Noticia Explicativa de la 2ª edición de la hoja 34-D (Lisboa) de la Carta Geológica de Portugal (Pais, J. et al, 2006), los Boletines Climatológicos Anuales publicados durante el período 2003-2014 y los Boletines Climatológicos Mensuales de Portugal Continental publicados durante el año 2015 por el Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA/MAM), que ofrecen los valores correspondientes a las principales variables climáticas en Lisboa.

El clima de la zona está muy condicionado por su localización y por las características del medio físico. La temperatura media anual del aire es de 16-17°C, registrándose valores medios mensuales más bajos durante el período de Diciembre a Febrero (10-12 °C) y más altos de Junio a Septiembre (20-23 °C) (Tabla 2) (Pais, J. et al, 2006) (IPMA/MAM, 2003-2015).

Relativamente a las precipitaciones, se registra un período más húmedo durante los meses de Octubre a Abril, correspondiendo los meses de Mayo a Septiembre a la época más seca (Fig. 10) (Tablas 2 y 3). La precipitación media anual es de 753-755 mm/año (Tablas 2 y 3) (IPMA/MAM, 2003-2015) (Valente, M.A., 2015). La evapotranspiración real anual alcanza valores del orden de los 550 mm, con excedentes de agua entre los meses de Diciembre a Marzo, que se cifran en aproximadamente 150 mm, y déficits de Junio a Septiembre de 250 mm (Pais, J. et al, 2006). En la tabla 3 y en la figura 9, que representan los valores obtenidos de la estación pluviométrica del Jardín Botánico desde su instalación, se puede observar la gran variabilidad de las precipitaciones, tanto mensual como anualmente, durante el período de 2011-2015.

Tabla 2.- Valores medios de las principales variables climáticas en Lisboa, obtenidos a partir de los Boletines Climatológicos Anuales publicados durante el período 2003-2014 y de los Boletines Climatológicos Mensuales publicados durante el año 2015 (Datos adaptados de Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2003-2015).

	Meses												Anual
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
<b>Temperatura máxima (°C)</b>	15	16	18	19	22	25	27	28	26	22	18	15	28
<b>Temperatura media (°C)</b>	11,5	12,5	14	15	17,5	20,5	22	23	21,5	18,5	14,5	12	<b>16,9</b>
<b>Temperatura mínima (°C)</b>	8	9	10	11	13	16	17	18	17	15	11	9	8
<b>Precipitación media (mm)</b>	110	111	69	64	39	21	5	6	26	80	114	108	<b>753</b>
<b>Días con precipitaciones</b>	11	12	8	8	6	3	1	1	3	8	10	11	82
<b>Horas de sol</b>	142	150	203	239	291	302	350	341	256	208	157	142	2781

Tabla 3.- Valores de precipitaciones medias mensuales y anuales, en milímetros, durante el período de 2011-2015, obtenidos de la estación pluviométrica del Jardín Botánico (Datos adaptados de Valente, M.A., 2015).

	2011	2012	2013	2014	2015	Media
<b>Enero</b>	103,3	18,1	155,5	194,8	90,7	112,48
<b>Febrero</b>	171,6	0	69,4	158,4	14,7	82,82
<b>Marzo</b>	89,4	58,5	276,6	65,5	22,8	102,56
<b>Abril</b>	136,1	58,7	43,4	65,6	72,8	75,32
<b>Mayo</b>	85,4	97,8	16,4	30,5	3,4	46,7
<b>Junio</b>	8,2	3,1	5,6	32,4	11,8	12,22
<b>Julio</b>	0,4	0,3	0,3	5,9		1,38
<b>Agosto</b>	35,7	10,2	0	0,1		9,2
<b>Septiembre</b>	21,5	56,8	61,3	118,3		51,58
<b>Octubre</b>	114,1	144,7	228,4	90,4		115,52
<b>Noviembre</b>	255,4	69,4	16,6	294,1		127,1
<b>Diciembre</b>	26,5	167,3	82,8	29,5		61,22
<b>Total</b>	1047,6	684,9	956,3	1085,5		754,86

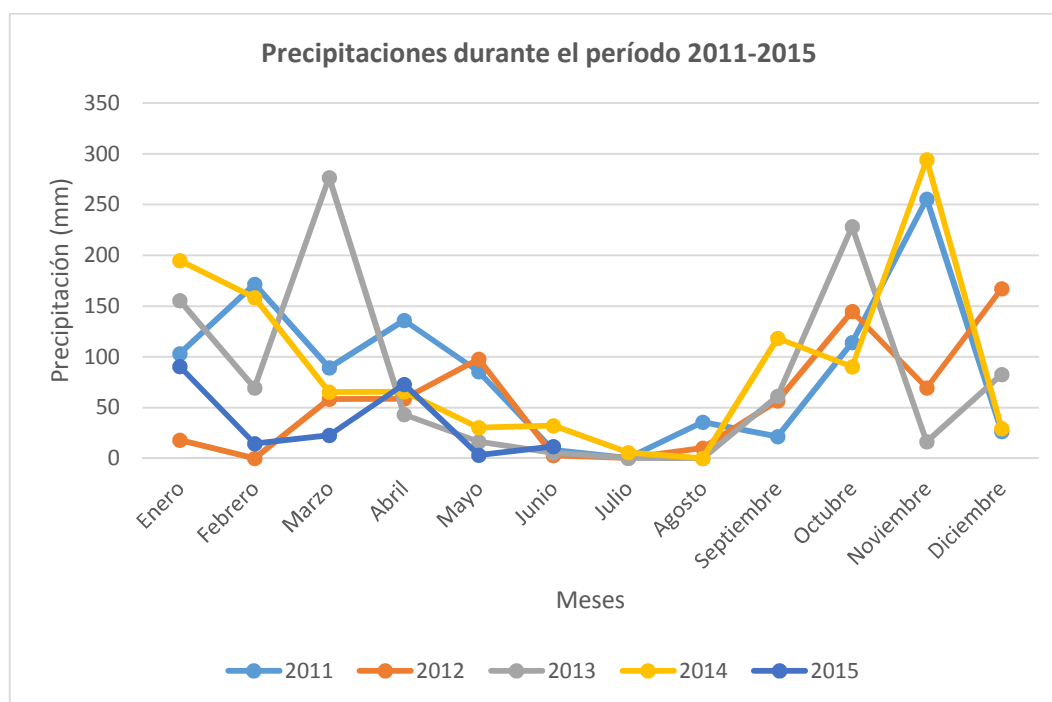


Figura 9.- Representación de la variación de las precipitaciones mensuales, en milímetros, durante el período de 2011-2015, obtenidas de la estación pluviométrica del Jardín Botánico (Datos adaptados de Valente, M.A., 2015).

Así, atendiendo a los registros existentes y de acuerdo con la clasificación climática de Koppen, la región es de clima templado con veranos calientes y secos. Por otro lado, según la clasificación de Thornthwaite, el clima es clasificado como sub-húmedo seco, 2º Mesotérmico, con déficit de agua moderado y baja eficacia térmica durante el verano (Pais, J. et al, 2006).

Además, como ocurre en todo el país, existe un desfase entre los regímenes térmico y pluviométrico, siendo los meses más calientes (Julio y Agosto) los que presentan menores precipitaciones.

Mediante el diagrama ombrotérmico de Gaussen (Fig. 10) se representa la variación de las precipitaciones y de las temperaturas medias mensuales en el Jardín Botánico. Permite diferenciar los períodos seco y húmedo, correspondiéndose el período seco con los meses en que la precipitación es inferior a dos veces la temperatura media (aproximación a la sequedad estacional,  $P < ETP$ ). En este diagrama, obtenido con los datos de precipitaciones y temperaturas medias mensuales del informe de la estación pluviométrica del Jardín Botánico (Valente, M.A., 2015) y de los Boletines Climatológicos del IPMA/MAM, se identifica un período seco de aproximadamente 4 meses en verano y un período húmedo que se extiende desde el mes de Septiembre (inicio del año hidrológico) hasta Mayo.

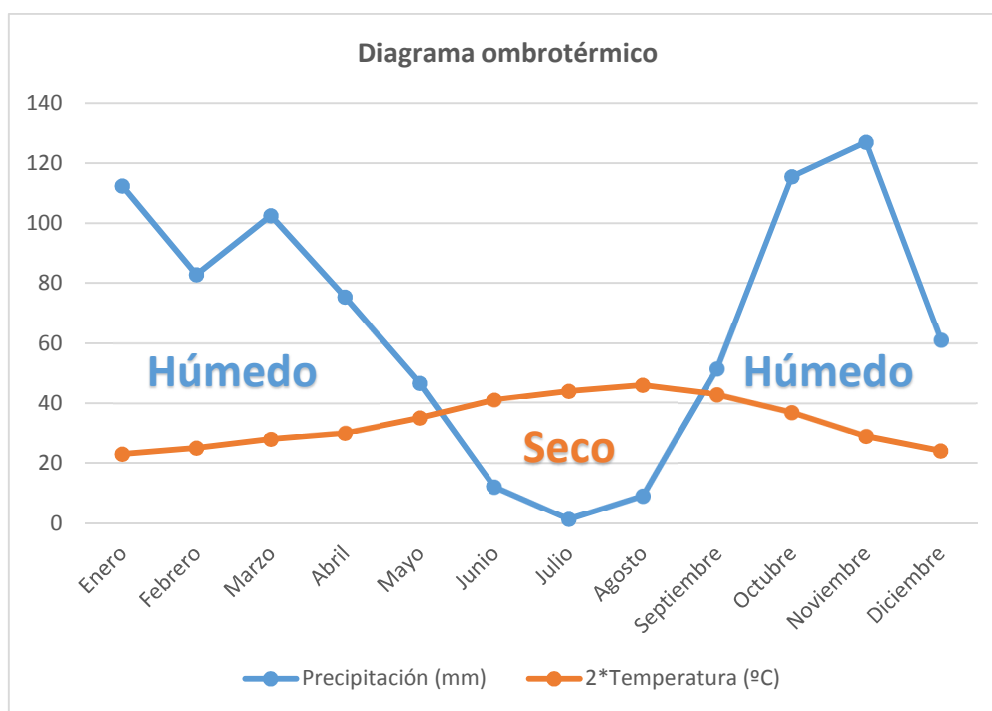


Figura 10.-Diagrama ombrotérmico de Gaussen. Representación de la variación de las precipitaciones, en milímetros, y temperaturas medias mensuales, multiplicadas por 2 y en grados Celsius, en el Jardín Botánico y diferenciación de los períodos seco y húmedo (Datos adaptados de la estación pluviométrica del Jardín Botánico y de los boletines climatológicos del IPMA/MAM, 2015).

## 6. Memoria constructiva

Para la realización de este proyecto se siguió un plan de trabajo organizado, tal como se podía observar en el cronograma de la tabla 1, consistente en la ejecución de diferentes actividades con el objetivo principal de caracterizar la piezometría y calidad del agua subterránea disponible en el área de estudio.

### a. Análisis bibliográfico

Fue efectuado un análisis bibliográfico para caracterizar el área de estudio, Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa, desde los puntos de vista geográfico, geológico, geomorfológico, hidrogeológico y climatológico.

También fueron analizados los principales documentos que sirven de base para el presente estudio de la piezometría y calidad del agua subterránea en el Jardín, los cuales son los estudios hidrogeológicos y geotécnicos elaborados por Grandewater y Geotest en 2011. Estos estudios ofrecen óptimas caracterizaciones del Jardín, así como un inventario y localización de los piezómetros instalados por la empresa Geotest y los resultados de los sondeos efectuados en los mismos.

Además, se consultaron las normativas portuguesas que regulan la calidad y establecen los límites de parámetros físico-químicos precisos para que el agua sea apta para su consumo en los diferentes usos – Decreto-Ley N° 236/98, de 1 de Agosto; Decreto-Ley N° 243/01, de 5 de Septiembre y Decreto-Ley N° 306/07, de 27 de Agosto.

### b. Trabajos de campo

#### i. Localización de los piezómetros accesibles

Las muestras de agua subterránea recogidas durante las campañas de campo fueron obtenidas en piezómetros previamente existentes, instalados por la empresa Geotest en 2011 para la caracterización hidrogeológica y geotécnica del Jardín – realización de sondeos. Fueron colocados un total de 22 piezómetros de los cuales, debido a la realización de obras de pavimentación y al crecimiento de la vegetación en la zona envolvente, sólo fue posible acceder a 10.

En la tabla 4 se presentan las coordenadas, profundidades y características de los piezómetros utilizados en el presente estudio. En la figura 11 queda representada la localización de cada uno de ellos dentro del área del Jardín Botánico.

De acuerdo con el Anexo XVII del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, sobre la frecuencia mínima de toma de muestras en aguas destinadas al riego, ésta debe ser de una vez por año, siempre que no se verifique ningún fenómeno susceptible



de provocar una degradación de la calidad del agua. En el presente estudio, se recogieron varias muestras de agua en cada piezómetro, unas destinadas para su análisis en campo y otras para su análisis posterior en laboratorio, en Marzo de 2015.

Tabla 4.- Coordenadas, en el sistema Hayford Gauss – Datum 73, profundidades y características de los piezómetros utilizados (Datos adaptados de Geotest, 2011).

Piezómetros	Coordenadas		Cota (m)	Profundidad (m)	Zona con rejillas	
	M (m)	P (m)			De (m)	A (m)
<b>S4</b>	-88484,181	-104869,318	77,09	15	6	15
<b>S5</b>	-88459,237	-104877,390	77,08	15	6	15
<b>S6</b>	-88433,245	-104892,872	76,94	15	6	15
<b>S8</b>	-88390,177	-104885,054	65,44	14	7,75	13,75
<b>S12</b>	-88254,193	-104882,647	43,21	15	9	15
<b>S13</b>	-88203,512	-104896,184	37,61	18,70	15,70	18,70
<b>S15</b>	-88264,357	-104998,108	51,08	15	7	15
<b>S17</b>	-88327,819	-105042,861	59,91	13	4	13
<b>S18</b>	-88361,004	-105020,977	62,23	12	3	12
<b>S20</b>	-88323,531	-104995,015	57,47	12	4	12



Figura 11.- Localización espacial de los piezómetros en el área del Jardín Botánico (Coordenadas adaptadas de Geotest, 2011).

## ii. Parámetros medidos *in situ*

Para la caracterización de los aspectos cualitativos del agua subterránea, se procedió a la medición *in situ* de los parámetros físico-químicos pH, conductividad eléctrica y temperatura en las muestras de agua recogidas en los piezómetros mediante tomadores de muestra adecuados. También fue medida la profundidad del nivel del agua y se recogieron varias muestras para su posterior análisis en laboratorio.

Primero, una vez conocida la localización exacta de los piezómetros accesibles, se procedió a la medición de la profundidad del nivel del agua subterránea en cada uno de ellos mediante una sonda de nivel (Fig. 12). El objetivo era poder determinar posteriormente el nivel piezométrico mediante la resta entre la cota de boca de cada piezómetro, valor proporcionado en el informe de la empresa Geotest, y la profundidad del agua (Tabla 5).

Antes de iniciar las mediciones de los parámetros físico-químicos se calibraron los diferentes aparatos. El agua captada en las primeras tomas de muestra se utilizó para lavar los frascos de polietileno que se iban a utilizar para almacenar el agua extraída de cada piezómetro para su posterior análisis en laboratorio, así como los frascos que se iban a utilizar para la medición de los parámetros físico-químicos *in situ* (pH, conductividad eléctrica y temperatura). Este proceso de lavado fue realizado en 3 etapas, comenzando únicamente a almacenar el agua en los frascos después del tercer lavado. Los frascos de polietileno utilizados para el almacenamiento de agua tenían dimensiones de 1 litro y 50 decilitros, fueron debidamente identificados y, en el caso de los de 50 decilitros, fueron sellados con una tapa doble para evitar la entrada de aire y, con ello, la inducción a error en la determinación de la cantidad de CO<sub>2</sub> libre en laboratorio y fueron guardados en frío hasta su posterior análisis.



Figura 12.- De izquierda a derecha: boca de piezómetro, sonda de nivel utilizada para la determinación de la profundidad del nivel del agua en cada piezómetro y tomador de muestras.



Figura 13.- Medidores de pH, conductividad eléctrica y temperatura utilizados para determinar estos parámetros físico-químicos *in situ*.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.- Características físicas y químicas del agua de los piezómetros obtenidas *in situ* en Marzo de 2015.

Piezómetros	Profundidad del agua (m)	Cota (m)	Nivel piezométrico (m)	Temperatura (°C)	pH	Conductividad eléctrica (μS/cm)
S4	7,25	77,09	69,84	19,4	6,87	1572
S5	6,65	77,08	70,43	19,1	7,14	1021
S6	5,45	76,94	71,49	17,8	7,41	877,3
S8	7,77	65,44	57,67	17,8	7,01	1344
S12	6,54	43,21	36,67	18,2	7,16	1382
S13	15,62	37,61	21,99	19,7	6,99	1519
S15	7,13	51,08	43,95	18,2	7,11	1697
S17	3,79	59,91	56,12	17,5	7,51	1950
S18	2,93	62,23	59,30	16,1	7,34	575,1
S20	3,47	57,47	54,00	17,2	7,18	1457

## 1. Temperatura

Las aguas subterráneas presentan temperaturas relativamente constantes que varían entre los 15 y 20°C a lo largo del año – en el área de estudio el agua subterránea presenta un rango de temperaturas que varían entre 16 y 19°C (Tabla 5). Por el contrario, la temperatura de las aguas superficiales suele ser más inconstante anualmente (grandes variaciones estacionales) y puede registrar instantáneamente valores superiores a los de las aguas subterráneas (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004).

De acuerdo con el Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, sobre la calidad del agua para consumo humano, la temperatura del agua deberá localizarse entre los 12°C (valor máximo recomendado – VMR) y los 25°C (valor máximo admisible – VMA). Los Decretos-Ley 243/01 y 306/07 no introducen



ninguna modificación en este aspecto y ninguno de ellos establece un valor paramétrico específico para la determinación de la aptitud del agua para su uso en el regadío, por lo que se adopta el mismo rango como valores de referencia por ser el uso agrícola menos exigente que el doméstico en lo que a calidad del recurso se refiere.

En la siguiente figura (Fig. 14) se puede observar que las temperaturas del agua subterránea medidas *in situ* en cada uno de los piezómetros se encuentran dentro del rango de 12-25°C y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

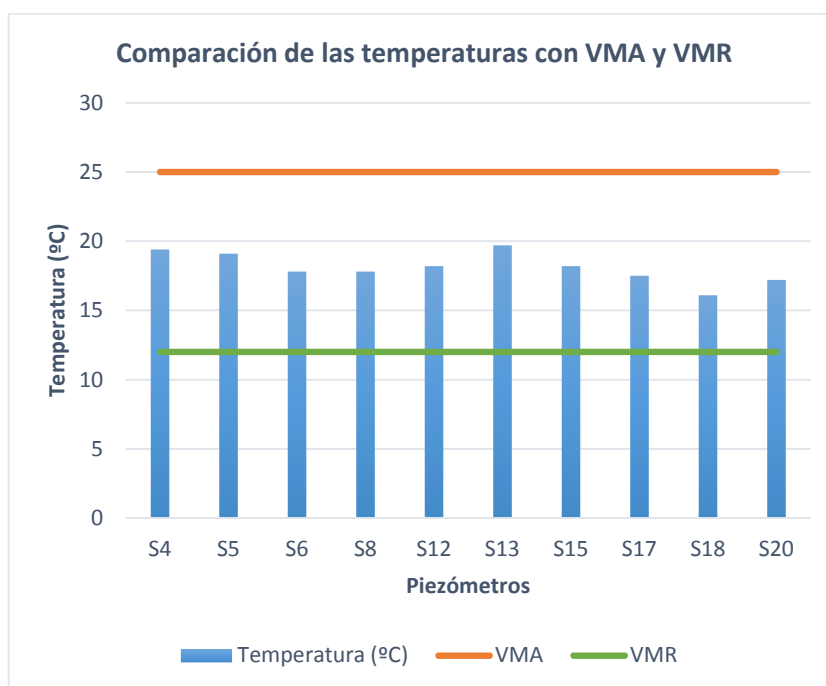


Figura 14.- Representación gráfica de los datos obtenidos *in situ* de la temperatura (°C) del agua subterránea en los piezómetros y comparación con el rango de temperaturas establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el consumo humano.

## 2. pH

El valor del potencial de hidrógeno o pH del agua es un indicador que determina la acidez o basicidad (alcalinidad) de la misma. Más específicamente, se trata de un índice de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en el agua y se define como el logaritmo de dicha concentración con signo negativo ( $-\log [H^+]$ ), de forma que cuanto mayor sea la concentración de iones, menor será el valor del pH (Smart Fertilizer Management, 2015).

El agua se encuentra disociada según la siguiente reacción (Marcó, J., 2015):



De manera que en un agua pura la concentración de  $H^+$  es igual a la de  $OH^-$  y su valor de pH es 7 (pH neutro). Las aguas en las que la concentración de  $H^+$  es superior a la de  $OH^-$  son ácidas y el valor de su pH está por debajo de 7. Por el contrario, las aguas cuya concentración de  $H^+$  es inferior a la de  $OH^-$  son básicas o alcalinas y su pH es superior a 7 (Marcó, J., 2015).

El pH del agua destinada al consumo humano está condicionado por el ácido carbónico existente y suele tener valores comprendidos entre 7,2 y 7,8. Esto se debe a que aguas con valores de pH inferiores o iguales a 7 favorecen los procesos de corrosión y aguas con valores de pH superiores a 8 favorecen las incrustaciones calcáreas (Marcó, J., 2015).

En el caso de las aguas destinadas a consumo agrícola, resulta de gran importancia saber que un pH demasiado alto puede provocar deficiencia de nutrientes – principalmente micronutrientes, como el hierro. Mantener el pH del agua de riego por debajo de 7 es también relevante para prevenir las obstrucciones debido a la precipitación de sales. Aunque, por otro lado, un pH demasiado bajo puede causar la toxicidad de los micronutrientes y daños al sistema radicular de la planta (Smart Fertilizer Management, 2015).

Por su parte, el pH de las aguas subterráneas varía normalmente entre 5,5 y 8,5 (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983), como se puede observar en los resultados obtenidos en el Jardín (Tabla 5).

De acuerdo con el Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, que establece la calidad de las aguas destinadas al riego, el VMR de pH se sitúa entre 6,5 y 8,4 y el VMA entre 4,5 y 9. Estos valores paramétricos se mantienen en los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, que establecen los parámetros indicadores para efectos de control del agua destinada al consumo humano, según los cuales el pH de estas aguas debe situarse entre 6,5 y 9 y no deben ser agresivas para los materiales con los que entren en contacto.

En las siguientes figuras (Figs. 15 y 16) se puede observar que los valores de pH del agua subterránea medidos *in situ* en cada uno de los piezómetros se encuentran dentro de los rangos establecidos por las normativas y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

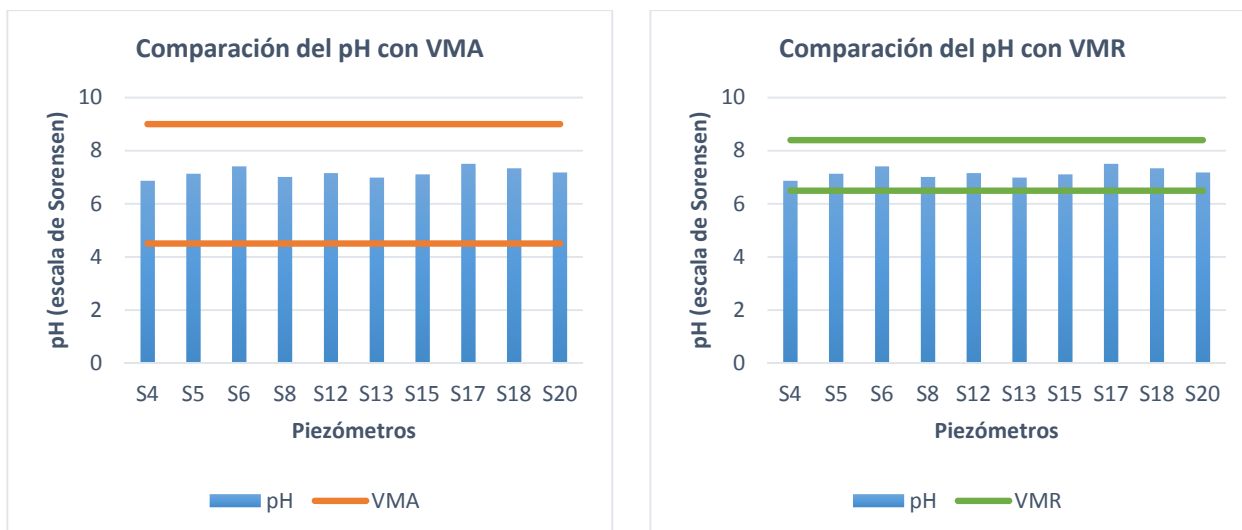


Figura 15.- Representación gráfica de los datos obtenidos *in situ* del pH (escala de Sorensen) del agua subterránea en los piezómetros y comparación con el rango de valores del VMA (gráfico de la izquierda) y del VMR (gráfico de la derecha) establecidos por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para su uso en el regadío.

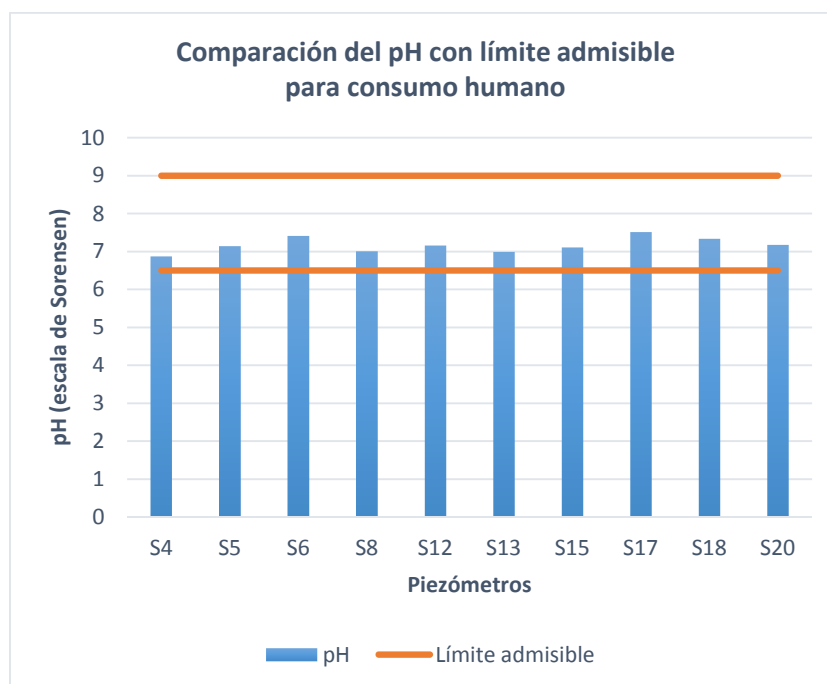


Figura 16.- Representación gráfica de los datos obtenidos *in situ* del pH (escala de Sorensen) del agua subterránea en los piezómetros y comparación con el rango de valores paramétricos establecidos por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

### 3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de un agua permite evaluar de forma rápida y global su grado de mineralización, es decir, la cantidad de sales o sólidos disueltos que tiene. Las sales disueltas e ionizadas que se encuentran en el agua la transforman en un electrolito con capacidad de conducir la corriente eléctrica, de forma que existe una relación proporcional entre la cantidad de sales disueltas y la resistencia que el agua ofrece al paso de la corriente eléctrica (mayor

conductividad del agua cuanto mayor sea la cantidad de sólidos o sales disueltas en ella). Las sales tienen diversos orígenes, pudiendo resultar de procesos como la lixiviación de los suelos o efluentes y residuos agrícolas o industriales, contaminando las aguas (FCUL, 2015).

Como es rápido y fácil medir la conductividad de una muestra de agua, este parámetro es muy empleado para determinar la cantidad de sólidos totales disueltos (STD) (contenido de sales solubles que contiene la muestra). Se suele aceptar la siguiente aproximación (FCUL, 2015):

$$\text{Conductividad eléctrica } (\mu\text{S/cm}) \approx \text{STD (ppm)} \times 2$$

Lo contrario a la conductividad es la resistividad que ofrece el agua al paso de la corriente, de forma que mediante este parámetro también se puede medir el contenido de sólidos disueltos en el agua (OoCities, 2015).

Los elevados valores de conductividad eléctrica medidos en la mayoría de las muestras recogidas en los piezómetros (Tabla 5) sugieren influencia de contaminación en las aguas subterráneas. Esto generalmente sucede en las zonas intensamente urbanizadas, como el presente área de estudio, y resulta de diversos factores tales como: la infiltración de efluentes domésticos e industriales resultantes de pérdidas en las redes de recogida y transporte, la infiltración de aguas pluviales y la infiltración del agua de limpieza de los pavimentos, que arrastra consigo todas las sustancias contaminantes presentes en la superficie (Silva, M.C.R. e Medeiros, A., 2011).

De acuerdo con los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, que establecen los parámetros indicadores para efectos de control del agua destinada al consumo humano, el valor límite de la conductividad eléctrica para estas aguas es de 2500  $\mu\text{S/cm}$  y no deben ser agresivas para los materiales con los que entren en contacto. Ninguno de los Decretos establece un valor paramétrico específico para la determinación de la aptitud del agua para el riego, por lo que se adopta el mismo como valor de referencia – al igual que se hizo con la temperatura, por ser el uso agrícola del agua menos exigente que el doméstico en lo que a calidad del recurso se refiere.

En la siguiente figura (Fig. 17) se puede observar que los valores de conductividad eléctrica del agua subterránea medidos *in situ* en cada uno de los piezómetros se encuentran por debajo del límite establecido por la normativa y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

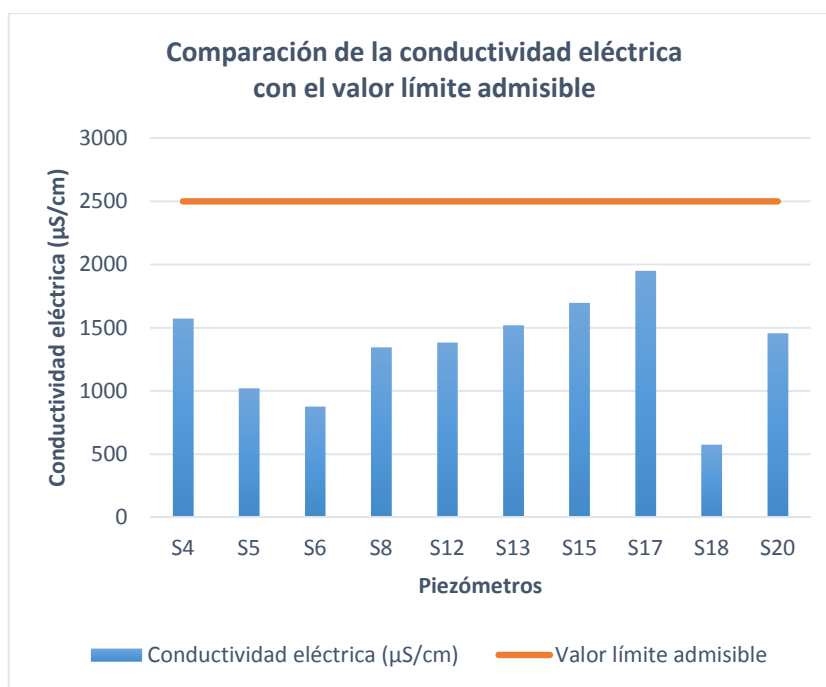


Figura 17.- Representación gráfica de los datos obtenidos *in situ* de la conductividad eléctrica (µS/cm) del agua subterránea en los piezómetros y comparación con el valor límite establecido por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

A continuación, se determinan las concentraciones de sólidos disueltos totales (mg/L) (Tabla 6) en las muestras de agua subterránea recogidas en cada piezómetro a partir de la siguiente aproximación, basada en los valores de conductividad eléctrica obtenidos en campo:

$$\text{STD (ppm)} \approx \text{Conductividad eléctrica (µS/cm)} / 2$$

Tabla 6.- Resultados de las concentraciones de sólidos disueltos totales para cada una de las muestras de agua recogidas en cada piezómetro, basados en los valores de conductividad eléctrica obtenidos en campo.

Piezómetros	Conductividad eléctrica (µS/cm)	STD (mg/L)
<b>S4</b>	1572	786
<b>S5</b>	1021	510,5
<b>S6</b>	877,3	438,65
<b>S8</b>	1344	672
<b>S12</b>	1382	691
<b>S13</b>	1519	759,5
<b>S15</b>	1697	848,5
<b>S17</b>	1950	975
<b>S18</b>	575,1	287,55
<b>S20</b>	1457	728,5

De acuerdo con el Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, sobre la calidad del agua para consumo humano, el valor máximo admisible (VMA) para la cantidad de sólidos disueltos totales es de 1500 mg/L. Los Decretos-Ley 243/01 y 306/07 no introducen ninguna modificación en este aspecto y ninguno de ellos establece un valor paramétrico específico para la determinación de la aptitud del agua para su uso en el regadío, por lo que se adopta el mismo como valor de referencia por ser el uso agrícola menos exigente que el doméstico en lo que a calidad del recurso se refiere.

En la siguiente figura (Fig. 18) se puede observar que las cantidades de STD determinadas para el agua subterránea en cada uno de los piezómetros se encuentran por debajo del VMA establecido por la normativa y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

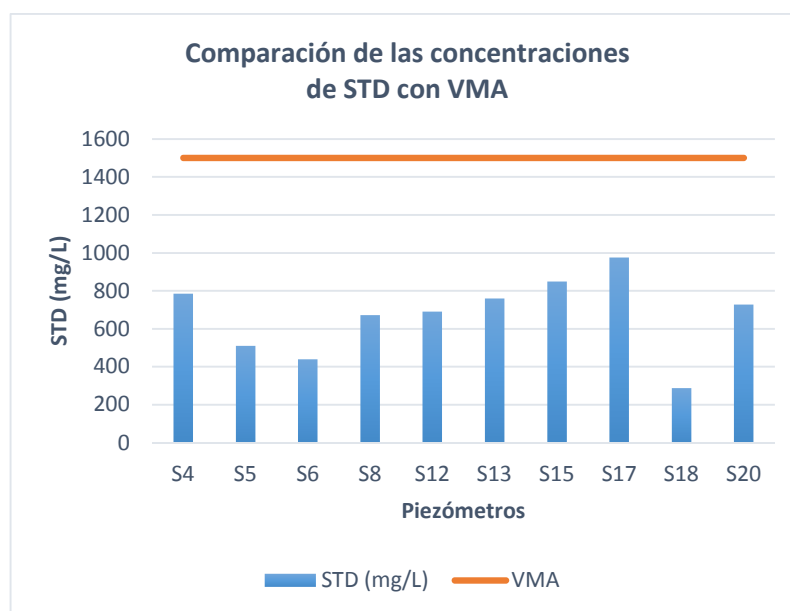


Figura 18.- Representación gráfica de los resultados obtenidos de las concentraciones de sólidos disueltos totales (mg/L STD), a partir de los valores de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) obtenidos en campo para el agua subterránea en los piezómetros y comparación con el valor máximo admisible (VMA) establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el consumo humano.

#### 4. Piezometría

Con base en la piezometría obtenida a partir de las mediciones in situ de la profundidad del nivel del agua y su resta a la cota de boca del respectivo piezómetro (Tabla 5), fue posible establecer la configuración de la superficie piezométrica de la zona envolvente a los piezómetros, conforme se representa en la figura 19.



Para la construcción del mapa de isopiezas de la figura 19 fue utilizado el método de regresión usual en geoestadística para la interpolación de datos, designado como “Kriging”. Esta técnica asume que los datos recogidos en una determinada región se encuentran correlacionados en el espacio, es decir, si en el área estudiada el nivel piezométrico en un punto P es X, es más probable que se encuentren resultados similares a X cuanto más próximo se esté del punto P (principio de la geoestadística). Sin embargo, a partir de una determinada distancia de P obviamente no se encontrarán valores próximos a X porque la correlación espacial puede dejar de existir (Silva, M.C.R. y Medeiros, A., 2011).

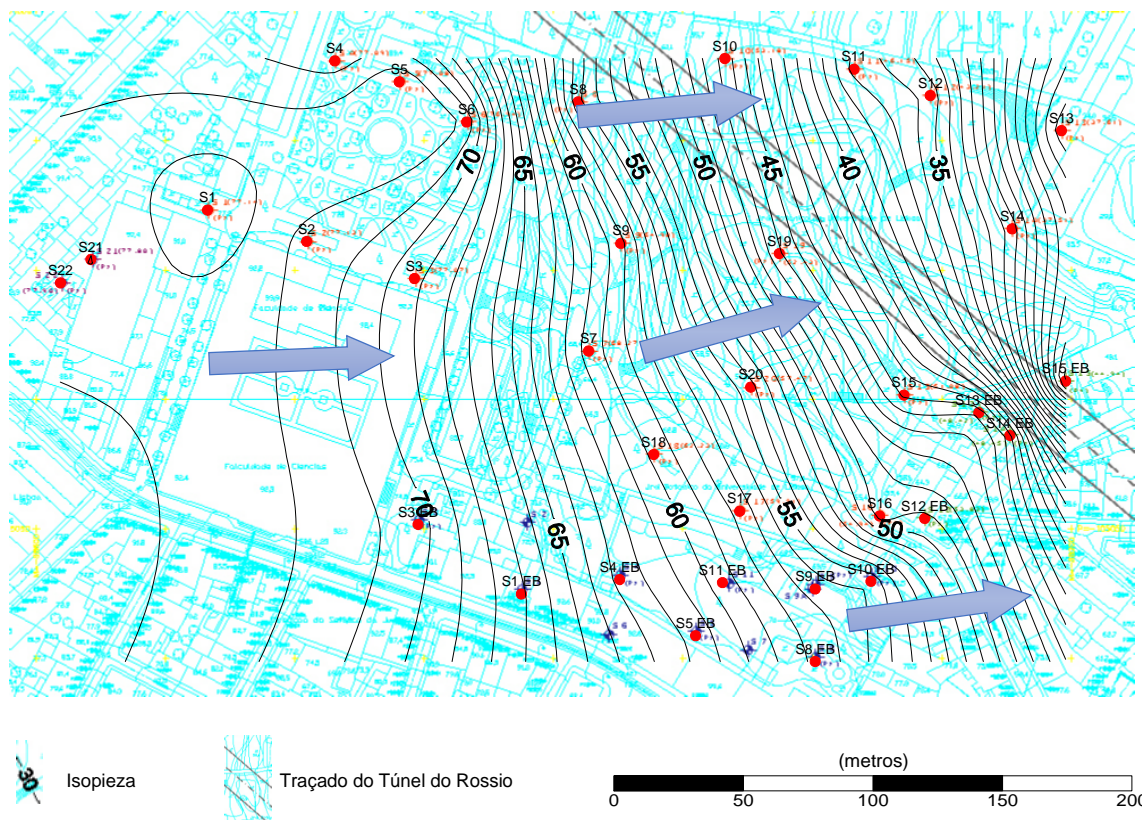


Figura 19.- Representación del mapa de isopiezas obtenido por “Kriking” y del sentido del flujo – desde los mayores hacia los menores niveles piezométricos –, con base en las profundidades de los niveles de agua medidas en los piezómetros en Marzo de 2015 (Adaptado del software Modflow, 2015).

Mediante la lectura de los resultados representados en la figura 19, es posible concluir que en la zona de estudio la escorrentía subterránea ocurre en un sentido próximo al Oeste-Este, acompañando a la topografía en dirección a la Avenida da Liberdade.

Las cotas piezométricas más elevadas, cerca de los 72 m, se sitúan en la zona más alta del Jardín Botánico (parte occidental del mismo), mientras que las más bajas, próximas a los 23 m, se localizan en la zona de menor cota (parte oriental), junto al muro de soporte del Jardín Botánico que confina con el Parque Mayer. De acuerdo con los datos obtenidos en el año 2000 sobre la piezometría en el

Parque Mayer (Hidroproyecto, 2003), sus cotas piezométricas del orden de 20 a 18 m darían continuidad a la superficie piezométrica ahora determinada.

La evolución de las líneas de igual cota piezométrica (isopiezas) es paralela y equidistante, con excepción a la singularidad que se observa en la zona de la Rua da Alegria, que implica un aumento del gradiente hidráulico medio como resultado de la interferencia del Túnel de Rossio en el flujo normal de las aguas subterráneas. El gradiente hidráulico medio asociado al flujo subterráneo, resultante de la superficie piezométrica definida por “Kriking”, es de 0,16, mientras que en la zona de la Rua da Alegria se observa localmente un aumento del gradiente hidráulico a un valor medio de 0,6.



### **c. Análisis en laboratorio**

Con el objetivo de obtener los parámetros físico-químicos necesarios para la determinación de la aptitud del agua para su uso en el regadío y para consumo humano, se realizaron diversos análisis en laboratorio siguiendo los protocolos establecidos y que se explican a continuación, evaluando: a) grado de dureza, alcalinidad y concentración de  $\text{CO}_2$ , utilizando titulaciones potenciométricas; b) especies catiónicas mayores, utilizando espectrometría de absorción atómica (AAS) y c) especies aniónicas mayores, utilizando cromatografía iónica (IC).

### **i. Titulaciones**

#### **1. Determinación de la alcalinidad del agua**

La alcalinidad se define como la capacidad cuantitativa del agua para neutralizar soluciones ácidas hasta un determinado pH sin inducir la perturbación de las actividades biológicas que ocurren en el sistema (UPRM, 2015). También se puede definir como la cantidad de ácido en mg/L que se requiere para disminuir el pH de la muestra a un valor de 4,45 (FCUL, 2015) y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas. Las aguas subterráneas presentan generalmente valores de pH entre 6 y 9 (Fosalba, C. et al, 2007).

En la mayoría de las aguas naturales la alcalinidad es producida principalmente por los iones carbonato y bicarbonato aunque, a veces, otros ácidos más débiles como el silícico, fosfórico, bórico y ácidos orgánicos pueden contribuir de forma significativa al desarrollo de esta propiedad. El valor de alcalinidad medio suele estar comprendido entre 100 y 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (IGME, 2015). La alcalinidad es de primordial importancia en algunos procesos que se llevan a cabo en sistemas de tratamiento de aguas ya que, entre otras características, evita los cambios bruscos de pH y es un componente que forma parte de las reacciones químicas en procesos tales como la coagulación y floculación o en la precipitación de calcio y magnesio para la remoción de la dureza (OoCities, 2015).

Para la determinación de este parámetro se pipetearon 100 mL de agua de cada frasco de 50 dL para un matraz de precipitación o Erlenmeyer de 250 mL. En primer lugar, se verificó el valor del pH de las muestras a analizar; cuando estaba estabilizado, se registró su valor mediante un medidor de pH debidamente calibrado y se fue adicionando la solución titulante de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,1 N al agua con agitación constante mediante un agitador magnético hasta obtener un pH igual a 4,45. Cuando el valor del pH se encontraba cerca del que se quería alcanzar, se comenzó a adicionar el titulante más lentamente, asegurando que el valor del pH se mantenía constante. Una vez alcanzado el valor de 4,45, se anotó el volumen de titulante gastado en el proceso (FCUL, 2015).

Para el cálculo de la alcalinidad se recurrió a la siguiente expresión (FCUL, 2015):

$$\text{Alcalinidad (ppm de CaCO}_3\text{)} = \text{Volumen gastado de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mL)} \times 50$$

En la tabla 7 se presentan los resultados del ensayo de alcalinidad para las muestras de agua subterránea recogidas en campo para cada piezómetro y en la figura 20 la representación de dichos resultados y su comparación con los valores medios generales establecidos por el IGME, donde se puede observar que el agua subterránea objeto de estudio presenta valores de alcalinidad muy altos, excepto la muestra obtenida en el piezómetro S18. Por esta razón se estudiará posteriormente, mediante la determinación del índice SAR (relación de adsorción del sodio) y la representación del diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff, si existe un **peligro potencial de alcalinización (sodificación) del terreno** en el caso de utilizar este agua para el riego del mismo, pues un alto contenido de bicarbonato en el agua unido a un elevado índice SAR o alto contenido en sodio provoca tanto la alcalinización como un aumento del pH.

Tabla 7.- Resultados del ensayo de alcalinidad realizado en laboratorio para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro.

Piezómetros	pH	T (°C)	V H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mL)	Alcalinidad (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )
<b>S4</b>	7,15	22,5	14,22	711,00
<b>S5</b>	7,37	22,2	10,11	505,50
<b>S6</b>	7,59	22,3	9,09	454,50
<b>S8</b>	7,25	22,8	11,56	578,00
<b>S12</b>	7,38	23,7	9,91	495,50
<b>S13</b>	7,2	22,7	11,67	583,50
<b>S15</b>	7,36	22,6	11,46	573,00
<b>S17</b>	7,76	22,7	8,72	436,00
<b>S18</b>	7,61	23,1	5,16	258,00
<b>S20</b>	7,38	23,7	12,42	621,00

#### a. Anión bicarbonato

El bicarbonato no se oxida ni se reduce en las aguas naturales, sin embargo puede precipitar con mucha facilidad como bicarbonato de calcio y, unido a un alto contenido de sodio en el agua (elevado índice SAR), puede inducir un peligro de alcalinización del terreno (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

Este parámetro es calculado a partir del valor ya determinado de la alcalinidad según la siguiente expresión (FCUL, 2015):

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)} = \text{Alcalinidad (mg/L CaCO}_3\text{)} \times 1,22$$

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 8.- Resultados de la concentración del anión bicarbonato para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro con base en los resultados del ensayo de alcalinidad.

Piezómetros	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)
S4	867,42
S5	616,71
S6	554,49
S8	705,16
S12	604,51
S13	711,87
S15	699,06
S17	531,92
S18	314,76
S20	757,62

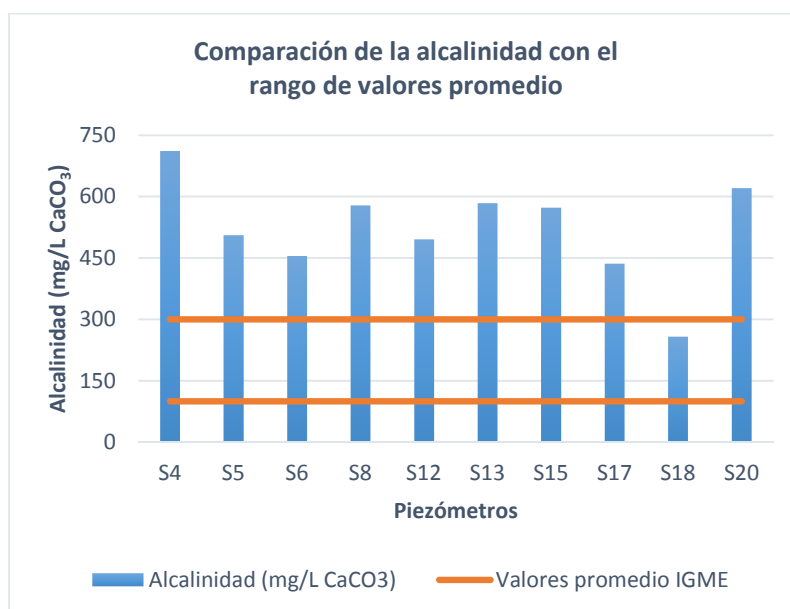


Figura 20.- Representación gráfica de los valores de alcalinidad (mg/L CaCO<sub>3</sub>) obtenidos en laboratorio de las muestras de agua subterránea recogidas en campo en cada piezómetro y comparación con los valores medios generales (Datos de valores medios de alcalinidad para aguas subterráneas adaptados del IGME, 2015).

## 2. Determinación de la dureza del agua

La dureza del agua refleja la presencia de sales de metales alcalino-terrosos (calcio, magnesio y estroncio) y de metales pesados (hierro, aluminio y manganeso). Es una propiedad ocasionada por la presencia de cationes metálicos polivalentes y se manifiesta por reacciones entre los cationes de dureza y ciertos aniones (como el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), los cuales forman incrustaciones.

Se debe principalmente a la presencia de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , ya que son los elementos más abundantes. Por ello, se pueden distinguir 3 tipos de dureza: dureza total, que involucra a todos los iones metálicos polivalentes que puedan encontrarse presentes en la muestra; dureza cálcica, que cuantifica sólo la dureza por efecto del ion calcio y la dureza magnesiana, que cuantifica sólo la dureza por efecto del ion magnesio. Otros cationes polivalentes (como el  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , etc.) pueden estar presentes en pequeñas concentraciones, pero casi siempre son insignificantes (Sunass, 2015) (OoCities, 2015).

Desde el punto de vista sanitario es irrelevante consumir agua de alta o baja dureza. Sin embargo, si la cantidad de calcio y magnesio es muy alta, cuando el agua se evapora o cambian sus condiciones se va a saturar la solución y formar un precipitado de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio que causará la formación de sarro en equipos y tuberías y los puede dañar irreversiblemente, causando problemas de incrustaciones, corrosión y pérdida de eficiencia. Para disminuir la dureza del agua a valores adecuados se pueden emplear resinas de intercambio iónico o el proceso de precipitación química de calcio y magnesio (Sunass, 2015) (OoCities, 2015).

El agua puede ser clasificada en función de su dureza – concentración de sales de calcio y magnesio –, expresada en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , en los siguientes tipos (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004):

- Agua muy dulce: de 0 a 60 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .
- Agua dulce o blanda: de 60 a 150 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .
- Agua medianamente dura: de 150 a 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .
- Agua dura: concentración mayor o igual a 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Las aguas duras son características de regiones de suelos calcáreos o dolomíticos. Las aguas subterráneas, debido al contacto más íntimo y prolongado con las formaciones geológicas, suelen ser más duras que las superficiales. Esto se debe a que suelen presentar mayores concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  disueltos, aumentando el poder de disolución de las rocas con las que contactan (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004).

Para la determinación de este parámetro se pipetearon 100 mL de agua de cada frasco de 50 dL para un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Posteriormente, se adicionaron 1,5 mL de la solución tampón de  $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$  y una pastilla tampón. Se agitó la solución mediante un agitador magnético hasta que la pastilla se disolvió por completo. En esta fase, las mezclas adquirirían una coloración rojiza/anaranjada. Se tituló lentamente la mezcla con la solución Titriplex A, con agitación constante, hasta que alcanzó un color verde. Cerca de su punto de equivalencia, la solución cambiaba su coloración de rojiza a castaña y, a partir de este punto, se debía adicionar más lentamente, gota a gota, el titulante hasta la aparición y permanencia del color verde (Fig. 23) (FCUL, 2015). Manteniendo

constante esta coloración, sin retorno para el color castaño, se anotó el volumen de titulante gastado durante el proceso.

Para el cálculo de la dureza se recurrió a la siguiente expresión (FCUL, 2015):

$$\text{Dureza (ppm de CaCO}_3\text{)} = \text{Volumen gastado del titulante A (mL)} \times 1000$$

De acuerdo con el Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, que establece los valores de los parámetros físico-químicos para el control de la calidad del agua destinada al consumo humano, el valor máximo admisible (VMA) para la dureza es de 500 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. Por otro lado, el Anexo I del Decreto-Ley 306/07, de 27 de Agosto, que incluye modificaciones para el mismo efecto, establece como deseable que la dureza total en carbonato de calcio en aguas destinadas al consumo humano esté comprendida entre 150 y 500 mg/L de CaCO<sub>3</sub> y no sean agresivas para los materiales con los que entran en contacto.

Como se puede observar en la figura 21, todas las muestras de agua subterránea recogidas en campo presentan valores muy altos de dureza, acercándose o superando el límite de 500 mg/L de CaCO<sub>3</sub> establecido por las normativas, excepto las muestras correspondientes a los piezómetros S5, S6, S8, S12 y S18, cuyas aguas captadas serían aptas para el consumo humano y para el uso agrícola – por ser menos exigente en cuanto a la calidad del recurso – de acuerdo con este parámetro químico.

Tabla 9.- Resultados del ensayo de dureza realizado en laboratorio para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro.

Piezómetros	V titulante A (mL)	Dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )
<b>S4</b>	0,67	670,00
<b>S5</b>	0,47	470,00
<b>S6</b>	0,40	400,00
<b>S8</b>	0,49	490,00
<b>S12</b>	0,48	480,00
<b>S13</b>	0,52	520,00
<b>S15</b>	0,62	620,00
<b>S17</b>	0,75	750,00
<b>S18</b>	0,27	270,00
<b>S20</b>	0,51	510,00

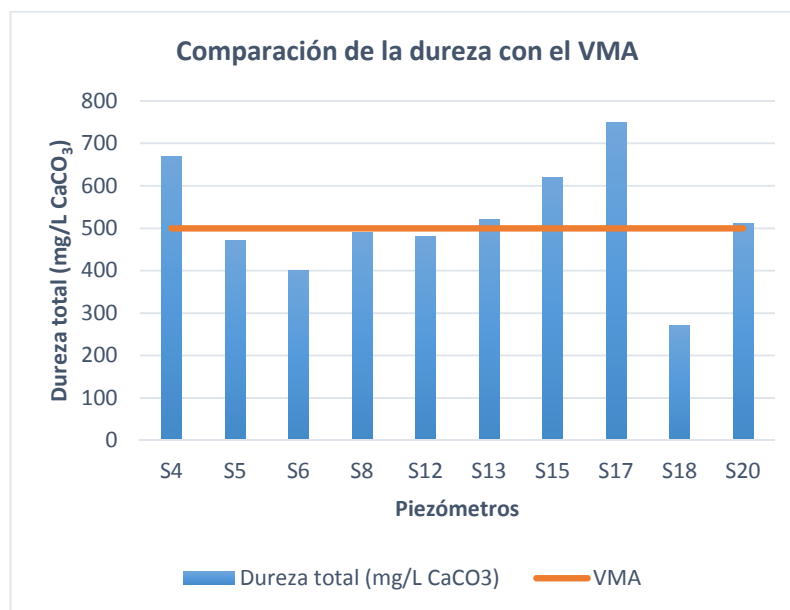


Figura 21.- Representación gráfica de los valores de dureza (mg/L CaCO<sub>3</sub>) obtenidos en laboratorio de las muestras de agua subterránea recogidas en campo en cada piezómetro y comparación con el valor máximo admisible según los Decretos-Ley 236/98 y 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.



Figura 22.- Multibureta utilizada en laboratorio para la realización de las titulaciones de medición de la alcalinidad y dureza de las muestras recogidas en campo en cada uno de los piezómetros accesibles.





Figura 23.- Cambios de color de la muestra de agua durante el proceso de medición de su dureza.

### 3. Determinación del CO<sub>2</sub> libre del agua

El CO<sub>2</sub> libre contenido en las aguas puede contribuir a la corrosión de las estructuras metálicas y otros materiales hechos a base de cimientos de los sistemas de abastecimiento de agua. Cuanto más CO<sub>2</sub> se disuelva en el agua, mayor es la acidez de esta y su ataque a los minerales de las rocas. Por ello, resulta de gran relevancia conocer el valor de este parámetro.

Para la determinación de este parámetro se pipetearon 100 mL de agua de cada frasco de 50 dL para un matraz de precipitación o Erlenmeyer de 250 mL. En primer lugar, se verificó el valor del pH de las muestras a analizar; cuando estaba estabilizado, se registró su valor mediante un medidor de pH debidamente calibrado y se fue adicionando la solución titulante de NaOH 0,0227 N al agua con agitación constante mediante un agitador magnético hasta obtener un pH igual a 8,3. Cuando el valor del pH se encontraba cerca del que se quería alcanzar, se comenzó a adicionar el titulante más lentamente, asegurando que el valor del pH se mantenía constante. Una vez alcanzado el valor de 8,3, se anotó el volumen de titulante gastado en el proceso (FCUL, 2015).

Para el cálculo de la cantidad de CO<sub>2</sub> libre se recurrió a la siguiente expresión (FCUL, 2015):

$$\text{CO}_2 \text{ libre (ppm de CO}_2\text{)} = \text{Volumen gastado de NaOH (mL)} \times 10$$

Los Decretos-Ley 236/98, 243/01 y 306/07, sobre la calidad del agua para los diferentes usos, no marcan ninguna limitación paramétrica para la concentración de anhídrido carbónico libre, estableciendo simplemente que el agua no debe ser agresiva para los materiales con los que entre en contacto. Como se puede observar en la figura 24, la concentración de CO<sub>2</sub> libre en las muestras de agua subterránea varía mucho entre los piezómetros.

Tabla 10.- Resultados del ensayo de CO<sub>2</sub> libre realizado en laboratorio para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro.

Piezómetros	pH	V NaOH (mL)	CO <sub>2</sub> libre (mg/L)
S4	7,07	3,49	34,90
S5	7,27	1,42	14,20
S6	7,51	0,86	8,60
S8	7,14	2,77	27,70
S12	7,30	1,49	14,90
S13	7,15	2,33	23,30
S15	7,30	1,66	16,60
S17	7,70	0,59	5,90
S18	7,47	0,58	5,80
S20	7,44	1,37	13,70

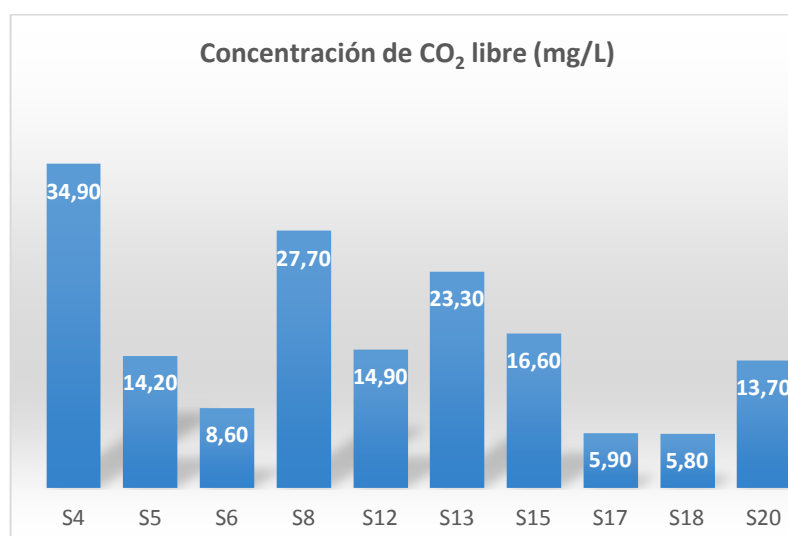


Figura 24.- Representación gráfica de los valores de CO<sub>2</sub> libre (mg/L CO<sub>2</sub>) obtenidos en laboratorio de las muestras de agua subterránea recogidas en campo en cada piezómetro.

## ii. Espectrometría de absorción atómica (AAS)

Este método permite determinar cualitativa y cuantitativamente la presencia de cationes y fue aplicado principalmente para determinar la concentración existente de los cationes de sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>) y magnesio (Mg<sup>2+</sup>).

Es una técnica de ejecución relativamente rápida y con una sensibilidad muy alta (principalmente para elementos como plomo, cadmio, cobre y cromo). El método se basa en el hecho de que los átomos en su estado estable pueden absorber radiación a una determinada longitud de onda, teniendo en cuenta que cada elemento tiene una absorción específica, es decir, absorbe la radiación de forma diferente, y por ello van a utilizarse diferentes lámparas catódicas en función del elemento que se vaya a analizar. La medida de la radiación absorbida es un valor cuantitativo de la concentración del elemento en análisis (Barradas, J., 1992). Esta

gran sensibilidad y selectividad de la espectrometría posibilita la determinación multielemental en una sola medida y prácticamente sin interferencias (UNLP, 2015).

El fundamento del método se basa en la absorción de luz y posterior emisión de radiación electromagnética por especies atómicas excitadas mediante una llama – excelente fuente para excitar muestras que contienen elementos de los grupos 1 y 2 de la tabla periódica, fácilmente ionizables. Los electrones excitados por esta fuente de energía, principalmente por aire acetileno, sufren un salto cuántico y posteriormente devuelven la energía recibida al medio, volviendo así a su orbital de origen (Barradas, J., 1992) (UNLP, 2015).

La energía devuelta en forma de un fotón de luz absorbe, a su vez, la radiación ultravioleta emitida por el catión específico del elemento químico en cuestión. De esta forma, los electrones presentes en la solución y que también sufren un salto cuántico, pero no pertenecen al mismo elemento que constituye el catión que se está analizando, no van a causar interferencia en el espectro final ya que absorberán sólo radiación con longitud de onda referente al elemento químico del cual forman parte (procedente de su respectiva lámpara catódica) (Barradas, J., 1992).

La instrumentación básica de este método de análisis en laboratorio consta de: una lámpara de cátodo hueco que emite radiación, de la cual existen diferentes tipos en función del catión que se pretenda analizar (Fig. 27); un nebulizador con tres entradas – de muestra, de gas combustible (aire acetileno) y de gas oxidante; un quemador con sistema de atomización que recibe la radiación procedente de la lámpara catódica y la muestra nebulizada y donde se va a generar la llama capaz de excitar la muestra atomizada. Posteriormente, la radiación absorbida por los electrones excitados es transmitida como fotones de luz a un monocromador, dispositivo óptico capaz de seleccionar y transmitir una estrecha banda de longitudes de onda. Por último, el sistema de detección, generalmente una película revelada, permite la obtención de los espectros, donde la posición de las líneas permite el análisis cualitativo y la densidad de las mismas el cuantitativo. Todos los espectros obtenidos de los diferentes elementos que componen la muestra son registrados en un ordenador (Figs. 25 y 26).

Los espectros atómicos son discretos (espectros de líneas), de forma que las principales dificultades en el análisis suelen deberse al ensanchamiento de las líneas por presión o por aparición del efecto Doppler. El efecto Doppler es provocado durante el proceso de atomización/ionización de la muestra, fase durante la cual las especies se pueden mover hacia dentro o fuera del detector, provocándose el desplazamiento de la línea espectral. El efecto de presión tiene lugar cuando chocan los átomos con otras especies presentes con las que intercambian energía. El efecto de ensanchamiento es mayor a medida que se incrementa la temperatura de excitación de la muestra (UNLP, 2015).

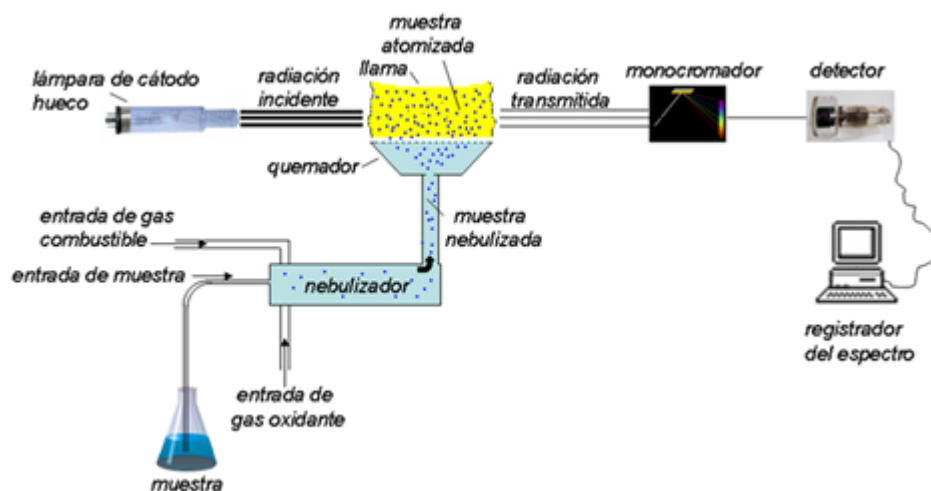


Figura 25.- Esquema del proceso de funcionamiento de la espectrometría de absorción atómica.



Figura 26.- Equipo utilizado para la realización del ensayo de espectrometría de absorción atómica.

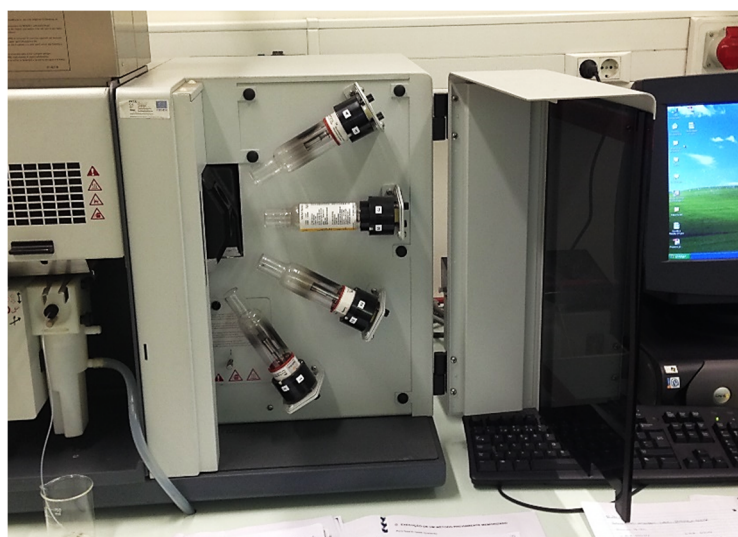


Figura 27.- Lámparas catódicas del equipo, diferentes para cada grupo de cationes que se pretenda detectar.

Tabla 11.- Concentraciones de los cationes  $K^+$  y  $Na^+$  obtenidas en laboratorio para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro mediante el método de espectrometría de absorción atómica (AAS).

Piezómetros	$K^+$			$Na^+$		
	Disolución	mg/L solución	mg/L muestra	Disolución	mg/L solución	mg/L muestra
<b>S4</b>	50	0,037	1,850	100	0,548	54,8
<b>S5</b>	20	0,173	3,460	50	0,566	28,3
<b>S6</b>	20	0,144	2,880	50	0,558	27,9
<b>S8</b>	20	0,133	2,660	100	0,562	56,2
<b>S12</b>	20	0,157	3,140	100	0,798	79,8
<b>S13</b>	50	0,100	5,000	200	0,479	95,8
<b>S15</b>	20	0,227	4,540	200	0,726	145,2
<b>S17</b>	50	0,140	7,000	200	0,453	90,6
<b>S18</b>	20	0,297	5,940	50	0,458	22,9
<b>S20</b>	1	1,982	1,982	200	0,459	91,8

Tabla 12.- Concentraciones de los cationes  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  obtenidas en laboratorio para cada una de las muestras recogidas en campo en cada piezómetro mediante el método de espectrometría de absorción atómica (AAS).

Piezómetros	Dureza total			
	Disolución	$V_{EDTA}$ (mL)	mg/L $Ca^{2+}$	mg/L $Mg^{2+}$
<b>S4</b>	10	0,26	104,0	99,56
<b>S5</b>	10	0,28	112,0	46,14
<b>S6</b>	10	0,3	120,0	24,28
<b>S8</b>	10	0,27	108,0	53,42
<b>S12</b>	10	0,29	116,0	46,14
<b>S13</b>	10	0,30	120,0	53,42
<b>S15</b>	1	3,44	137,6	67,02
<b>S17</b>	10	0,44	176,0	75,28
<b>S18</b>	10	0,19	76,0	19,43
<b>S20</b>	10	0,37	148,0	34,00

## 1. Catión potasio

A pesar de ser un elemento abundante en la corteza terrestre, aparece en bajas concentraciones en las aguas subterráneas, debido principalmente a ser fácilmente fijado por las arcillas e intensivamente consumido por los vegetales. Sus principales fuentes minerales son los feldespatos potásicos y micas (moscovita y biotita), que presentan poca resistencia a las erosiones físicas y químicas. Su concentración en las aguas subterráneas varía generalmente entre 0,1 y 10 mg/L (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

De acuerdo con el Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, sobre la calidad del agua para consumo humano, el valor máximo recomendado (VMR) para la concentración del catión potasio es de 10 mg/L y el valor máximo admisible (VMA) de 12 mg/L. Los Decretos-Ley 243/01 y 306/07 no introducen



ninguna modificación en este aspecto y ninguno de ellos establece un valor paramétrico específico para la determinación de la aptitud del agua para su uso en el regadío, por lo que se adopta el mismo rango como valores de referencia por ser el uso agrícola menos exigente que el doméstico en lo que a calidad del recurso se refiere.

En la siguiente figura (Fig. 28) se puede observar que las concentraciones del catión potasio en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por debajo de los límites establecidos (VMR y VMA) por el Decreto-Ley 236/98 y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

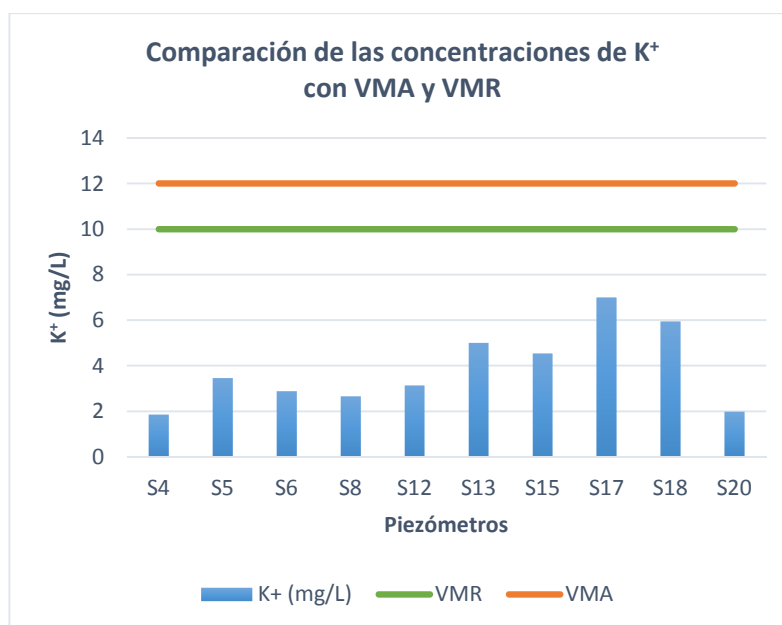


Figura 28.- Representación de la concentración del catión potasio (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante espectrometría de absorción atómica, y comparación con el VMR y el VMA fijados por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el consumo humano.

## 2. Catión sodio

Se trata de un elemento químico alcalino de gran abundancia en las aguas subterráneas, donde su concentración varía generalmente entre 0,1 y 100 mg/L (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983). La concentración de este elemento químico en el agua es el principal factor limitante de su uso agrícola ya que induce el deterioro del suelo, perjudicando de forma irreversible el ciclo de crecimiento de las plantas. En acuíferos litorales, la presencia de este elemento en el agua puede indicar la existencia de intrusiones de cuñas salinas y sprays marinos.

El Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, sobre la calidad del agua para consumo humano, establece un VMR de 20 mg/L de Na<sup>+</sup> y un VMA de 150 mg/L de Na<sup>+</sup>. Estos rangos han sido modificados por los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01



y 306/07, que establecen un valor límite para la concentración de catión sodio de 200 mg/L. Ninguna de las normativas establece un valor paramétrico de la concentración de este catión para el uso del agua en el riego por lo que, al igual que se hizo anteriormente, se toma este valor de referencia por ser el regadío un uso menos exigente que el doméstico en lo que a calidad del recurso se refiere.

En la siguiente figura (Fig. 29) se puede observar que las concentraciones del catión sodio en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por debajo del límite establecido por el Decreto-Ley 306/07 – siendo incluso demasiado bajas – y, por tanto, se trata de un agua **apta** tanto para el riego como para consumo humano en este aspecto.

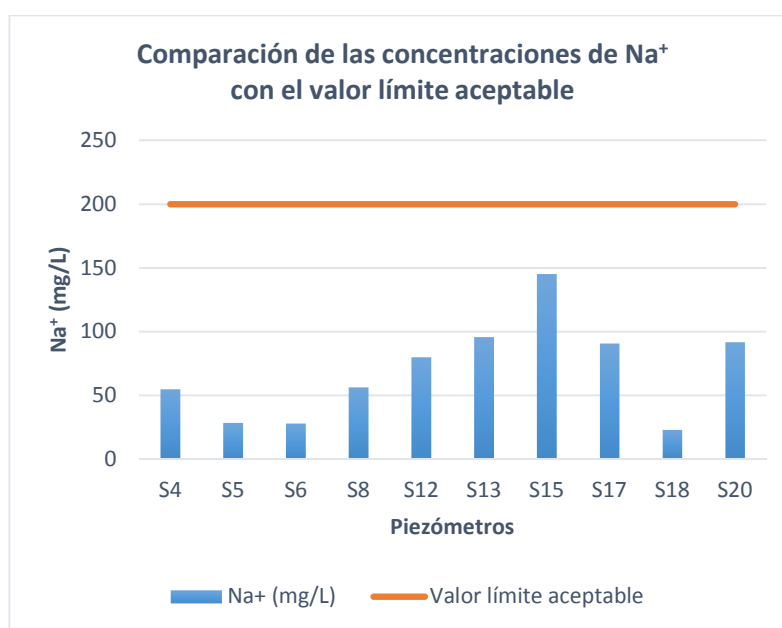


Figura 29.- Representación de la concentración del catión sodio (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante espectrometría de absorción atómica, y comparación con el límite aceptable fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

### 3. Catión calcio

Su concentración en las aguas subterráneas varía generalmente entre 10 y 100 mg/L, siendo las principales fuentes minerales de calcio las plagioclasas cálcicas, calcita, dolomita y apatita (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983). El carbonato de calcio, forma en que este elemento aparece en las aguas, es considerado poco soluble en el agua pura. Su solubilidad depende principalmente de los factores temperatura y presión, que también influyen en la cantidad de CO<sub>2</sub> disuelto en el agua, por lo que se puede concluir que la solubilidad del carbonato de calcio es función de la cantidad de gas carbónico disuelto.

El Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, sobre la calidad del agua para consumo humano, establece un VMR de 100 mg/L de  $\text{Ca}^{2+}$ . Por su parte, el Anexo I del Decreto-Ley 306/07 establece como no deseable que la concentración de calcio sea superior a 100 mg/L y que el agua no debe ser agresiva para los materiales con los que entre en contacto.

En la siguiente figura (Fig. 30) se puede observar que las concentraciones del catión calcio en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por encima del valor límite deseable establecido por el Decreto-Ley 306/07, a excepción de la muestra recogida en el piezómetro S18 y, por tanto, no se trata de un agua apta para consumo humano en este aspecto y no se puede concluir nada sobre su calidad para el riego.

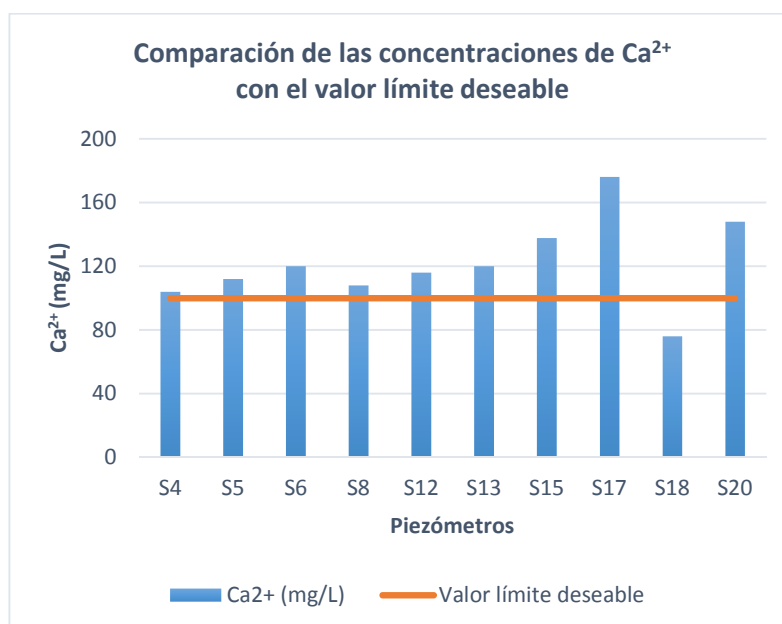


Figura 30.- Representación de la concentración del catión calcio (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante espectrometría de absorción atómica, y comparación con el valor límite deseable fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

#### 4. Catión magnesio

El magnesio es un elemento de comportamiento geoquímico semejante al calcio, sin embargo forma sales más solubles. En las aguas subterráneas se consideran como principales fuentes minerales de magnesio la biotita, piroxena y anfíbolita. Estos minerales presentan mayor resistencia a la erosión química que los que aportan calcio, razón por la que la concentración de magnesio es generalmente inferior a la de calcio en las aguas subterráneas. Ésta varía generalmente entre 1 y 40 mg/L, formando junto con el calcio el grupo de elementos químicos de mayor influencia en la dureza del agua (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

El Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, sobre la calidad del agua para consumo humano, establece un VMR de 30 mg/L de  $Mg^{2+}$  y un VMA de 50 mg/L de  $Mg^{2+}$ . Por su parte, el Anexo I del Decreto-Ley 306/07 establece como no deseable que la concentración de magnesio sea superior a 50 mg/L y que el agua no debe ser agresiva para los materiales con los que entre en contacto.

En la siguiente figura (Fig. 31) se puede observar que las concentraciones del catión magnesio en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por encima del valor límite deseable establecido por el Decreto-Ley 306/07 en los piezómetros S4, S8, S13, S15 y S17 y, por tanto, no se trata de un agua apta para consumo humano en este aspecto y no se puede concluir nada sobre su calidad para el riego.

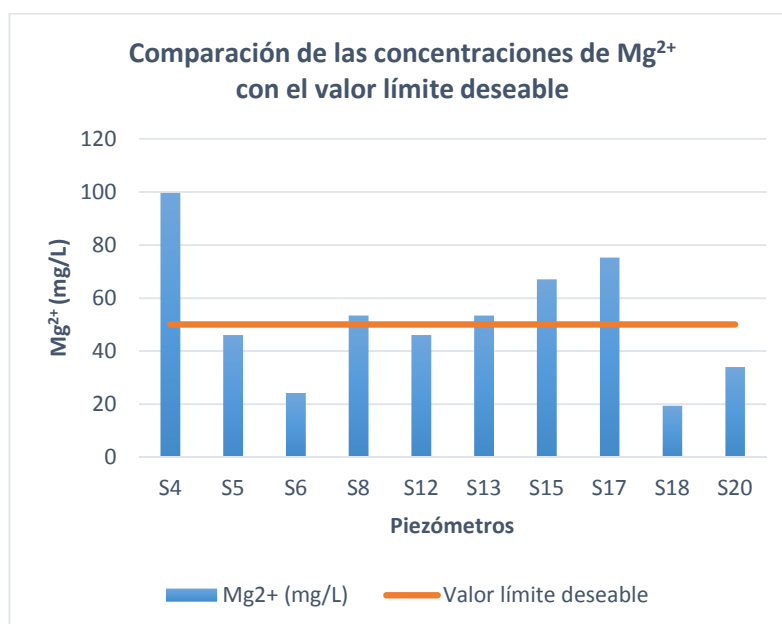


Figura 31.- Representación de la concentración del catión magnesio (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante espectrometría de absorción atómica, y comparación con el valor límite deseable fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

Estas altas concentraciones de los cationes calcio y magnesio presentes en el agua subterránea, en comparación con las bajas cantidades del catión sodio y también debido a la alta conductividad eléctrica medida en campo, implicarán posteriormente, en el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos, la obtención de un bajo índice SAR (relación de adsorción del sodio) y un elevado peligro de salinización (Balairón, L., 2010).

### iii. Cromatografía iónica (IC)

Se trata de un sistema de cromatografía de alta presión en el que son utilizadas columnas de intercambio iónico, columnas subpresoras y un detector de conductividad para la determinación de aniones en medio acuoso.

A pesar de ser aplicable a una gran gama de compuestos, el análisis simultáneo de aniones inorgánicos (fluoruro, cloruro, nitrito, bromuro, nitrato, fosfato y sulfato) continúa siendo la principal aplicación de esta técnica, generalmente por detección conductimétrica con subpresión química. Este método de detección permite el uso de eluyentes con elevada fuerza iónica, obteniéndose mayores variaciones en la selectividad iónica en comparación con la detección conductimétrica sin subpresión.

Los parámetros más comunes que determinan la separación de los aniones inorgánicos de la columna subpresora son la fuerza iónica y el pH del eluyente. El tiempo de retención de los iones en la columna, que permitirá su selectividad en los gráficos finales, es afectado generalmente por la fuerza iónica del eluyente, mientras que el pH afecta mayoritariamente a los tiempos de retención de ácidos débiles, como el fosfato.

El sistema cromatográfico está constituido esencialmente por un eluyente, una bomba, un inyector o válvula de inyección, una precolumna de separación, una columna analítica o subpresora, una célula de conductividad asociada a un detector y un integrador o sistema de recogida de datos (Figs. 32 y 33).

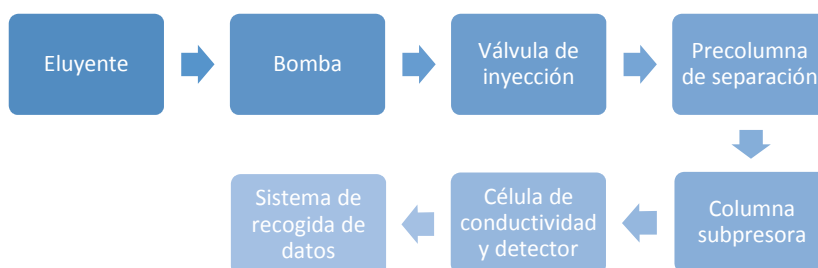


Figura 32.-Representación del proceso de cromatografía iónica.

La bomba lleva al eluyente al sistema cromatográfico. El flujo oscila generalmente entre 1,0-2,0 mL/min dependiendo de las dimensiones y características de la columna subpresora.

La válvula de inyección es responsable de la inyección de la muestra que se encuentra atrapada en el “loop”, generalmente 25 µL (Fig. 34), tras su inyección en el equipo de cromatografía iónica mediante una jeringilla.

En la precolumna de separación de los aniones de la muestra, las resinas utilizadas en cromatografía aniónica funcionan con una carga fija y un contra-ion asociado, siendo la función de intercambio realizada generalmente por el amonio cuaternario.

En la columna subpresora, después de la separación de los aniones por intercambio aniónico, la fase móvil pasa por un sistema de subpresión constituido por una membrana de intercambio catiónico de  $H^+$ . El eluyente es neutralizado y su conductividad es reducida, lo que permite una detección conductimétrica de los aniones del analito en un eluyente de baja conductividad de fondo. Los aniones de la fase móvil quedan retenidos en la membrana de la columna subpresora durante un determinado tiempo, denominado tiempo de retención, que es diferente para cada anión y después son movidos por el eluyente a la célula de conductividad. El proceso de regeneración de la membrana es efectuado simultáneamente mediante la circulación en sentido contrario al eluyente de una solución regeneradora, generalmente de un ácido fuerte.

La célula de conductividad está asociada a un detector de conductividad y posee dimensiones bastante reducidas. Controla continuamente la conductividad del eluyente y sus variaciones debidas a la salida de los aniones de la columna subpresora tras sus respectivos tiempos de retención.

El integrador permite la obtención de un registro con las correspondientes alturas de pico (o áreas de pico), así como los respectivos tiempos de retención (Fig. 35). Las áreas de pico permitirán determinar la concentración existente de cada anión y los tiempos de retención su identificación en los picos del registro. Para ello, primeramente se ha de trabajar con muestras patrón que se formarán con diferentes concentraciones de todos los aniones. Después de trabajar con estas muestras y determinar para cada anión el tiempo de retención medio, las áreas de pico y la concentración a la que corresponden, se trabajará con las muestras recogidas en cada piezómetro, de forma que se podrán identificar rápidamente en los gráficos las áreas de pico correspondientes a cada anión y, mediante reglas de tres con la relación área de pico/concentración obtenida en las muestras patrón, se podrá determinar la concentración correspondiente del anión en cada muestra de agua subterránea.

La función del eluyente es competir con los iones de la muestra por los iones de la fase estacionaria (locales activos) y separar los iones de la muestra en un espacio de tiempo razonable (tiempos de retención) y en bandas bien definidas. Así, el principal componente del eluyente es el ion de competición. Al escoger el eluyente se deben tener en cuenta algunos factores para no afectar a las características de elución de los iones de la muestra, principalmente la compatibilidad con el método de detección, el pH y la naturaleza y concentración del ion de competición.

Para la determinación de los aniones, se utilizó inicialmente como eluyente una solución de  $\text{NaHCO}_3 - 0,2 \text{ mmol/dm}^3 / \text{Na}_2\text{CO}_3 - 1,8 \text{ mmol/dm}^3$ . Por el hecho de que en las muestras existiesen concentraciones que camuflaban la existencia de posibles aniones (concentraciones de aniones inferiores al límite detectable por la máquina), hubo necesidad de disminuir la concentración del eluyente un 50%.



Figura 33.- Equipo utilizado para la realización del ensayo de cromatografía iónica (IC).

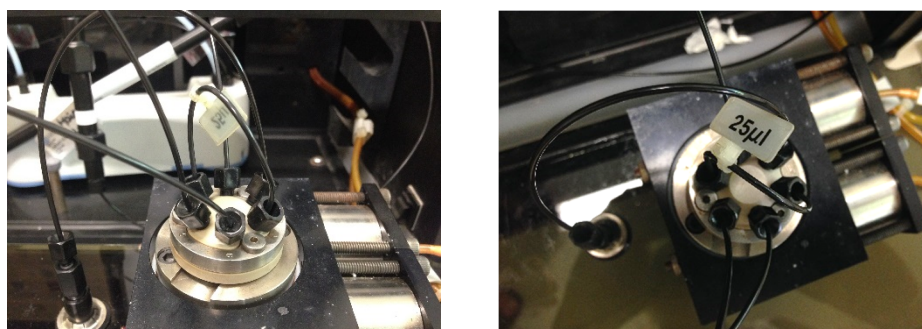


Figura 34.- “Loop” donde queda atrapada la muestra de agua hasta ser inyectada por la válvula de inyección en la precolumna del equipo.

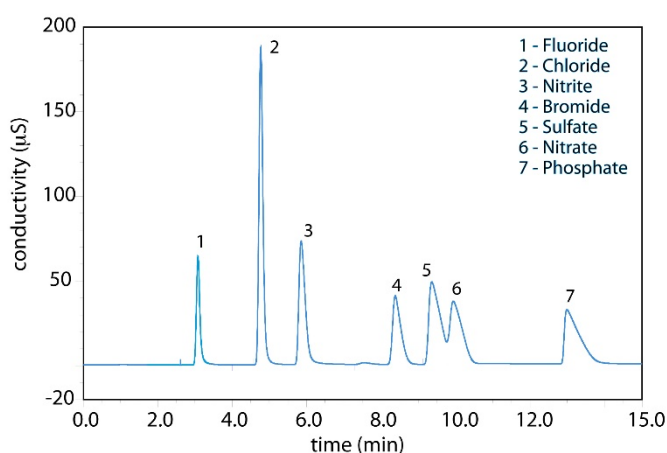


Figura 35.- Ejemplo de gráfico obtenido mediante el equipo de cromatografía iónica y determinación de los aniones correspondientes a los picos del gráfico según su respectivo tiempo de retención.



Tabla 13.- Concentraciones de los aniones en los patrones utilizados en el ensayo de laboratorio de cromatografía iónica (IC).

Patrones	Concentraciones de los aniones (mg/L)						
	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>p1</b>	0,1	4,0	0,8	0,5	1,0	0,8	8,0
<b>p3</b>	0,7	27,5	5,5	3,3	45,8	5,5	102,0
<b>p4</b>	1,0	38,6	7,7	4,6	78,8	7,7	146,7
<b>p5</b>	1,3	49,6	9,9	6,0	103,5	9,9	190,8

Tabla 14- Concentraciones de los aniones en las muestras de agua subterránea recogidas en campo en los piezómetros, medidas en laboratorio mediante el ensayo de cromatografía iónica (IC) (-, no determinado por causa de ser las concentraciones del anión en la muestra inferiores a los límites de detección de la máquina).

Piezómetros	Concentraciones de los aniones (mg/L)						
	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
<b>S4</b>	-	49,25	-	-	0,83	-	195,82
<b>S5</b>	0,62	45,51	-	-	0,09	-	78,15
<b>S6</b>	0,28	37,31	-	-	0,33	-	54,00
<b>S8</b>	-	60,11	-	-	0,88	-	111,31
<b>S12</b>	0,19	63,59	-	-	7,14	-	180,67
<b>S13</b>	0,48	66,82	-	-	0,42	-	201,38
<b>S15</b>	-	82,71	-	-	10,65	-	234,92
<b>S17</b>	0,95	74,60	-	-	3,94	-	364,86
<b>S18</b>	-	28,13	-	-	0,12	-	86,00
<b>S20</b>	-	62,06	-	-	-	-	193,05

## 1. Cloruros

Se trata de una de las sales más abundantes en la naturaleza, aunque en las aguas superficiales presenten cantidades inferiores a 50 mg/L. Las fuentes antropogénicas de los cloruros son los efluentes domésticos e industriales y las aguas utilizadas para el riego. También pueden estar presentes en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, siendo en estas últimas donde se encuentran en mayor concentración debido a las rocas evaporíticas (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983) (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004).

De acuerdo con el Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98 sobre la calidad del agua destinada para el riego, el valor máximo recomendable (VMR) es de 70 mg/L de Cl<sup>-</sup>. Por otro lado, según el Anexo VI del mismo Decreto, sobre la calidad del agua para consumo humano, el VMR es de 25 mg/L de Cl<sup>-</sup>, valor aumentado por los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, sobre los valores indicadores establecidos para efectos de control del agua destinada al consumo humano, los cuales establecen un valor paramétrico de 250 mg/L de Cl<sup>-</sup> y que el agua no debe ser agresiva para los materiales con los que entre en contacto.

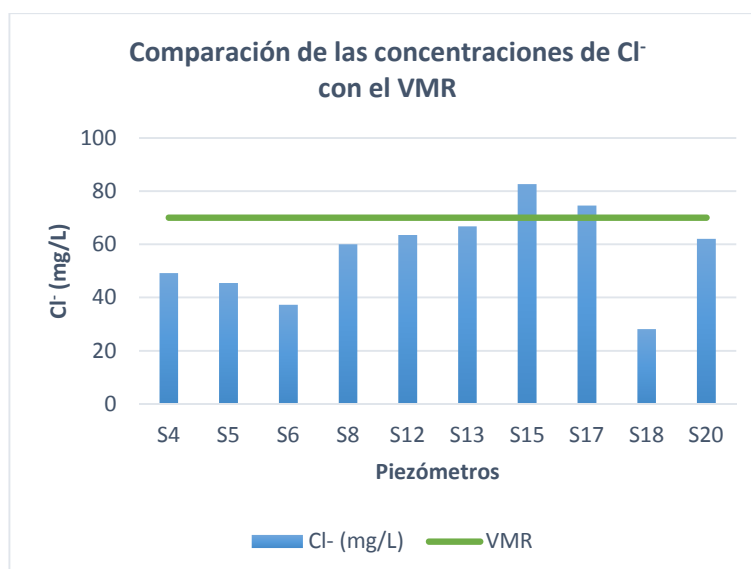


Figura 36.- Representación de la concentración del ion cloruro (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el valor máximo recomendable (VMR) establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego.

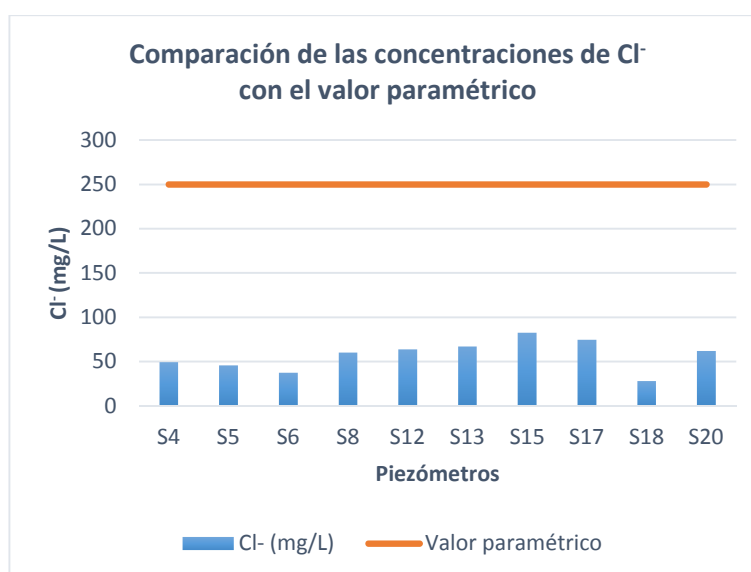


Figura 37.- Representación de la concentración del ion cloruro (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el valor paramétrico fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

En las figuras 36 y 37 se puede observar que las concentraciones de cloruros en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, son bastante altas, llegando a superar en el caso de los piezómetros S15 y S17 el VMR por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego, aunque no llegan a sobrepasar el actual valor paramétrico establecido por el Decreto-Ley 306/07 para que sea apta para consumo humano.

No se puede concluir que el agua no sea apta para el riego en este aspecto ya que concentraciones superiores al VMR no implican que el agua sea impropia para su uso. Las posibles causas de estas altas concentraciones del ion cloruro son un alto grado de utilización de fertilizantes y fitosanitarios en el Jardín y la contaminación del agua producida por los efluentes domésticos y/o industriales, como también afirmaban los elevados valores de conductividad eléctrica obtenidos en campo.

## 2. Fluoruros

Los fluoruros son encontrados generalmente en pequeñas concentraciones en las aguas subterráneas. Su principal fuente es la disolución de minerales como la fluorita y la apatita en rocas ígneas. Es un elemento químicamente muy reactivo por lo que se encuentra combinado en la forma de fluoruros de calcio, sodio u otros metales (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004). El rango de concentraciones de flúor en las aguas naturales es generalmente inferior a 1 mg/L, aunque ya fueron determinadas concentraciones que alcanzan los 50 mg/L. Las concentraciones más elevadas de flúor suelen darse en aguas que presentan una pequeña concentración relativa de calcio (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

De acuerdo con el Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98 sobre la calidad del agua destinada para el riego, el valor máximo recomendable (VMR) es de 1 mg/L de  $F^-$  y el valor máximo admisible (VMA) de 15 mg/L de  $F^-$ . Por otro lado, los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, sobre los valores indicadores establecidos para efectos de control del agua destinada al consumo humano, establecen un valor paramétrico de 1,5 mg/L de  $F^-$ .

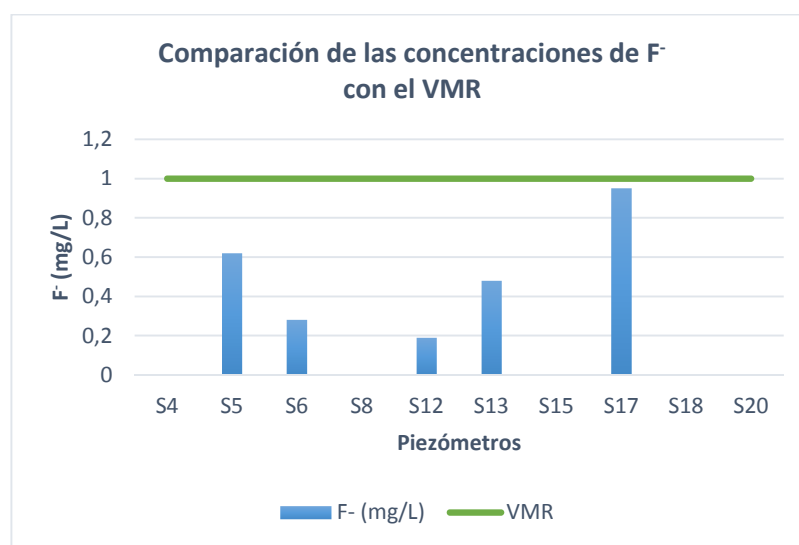


Figura 38.- Representación de la concentración del ion fluoruro (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el VMR establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego.

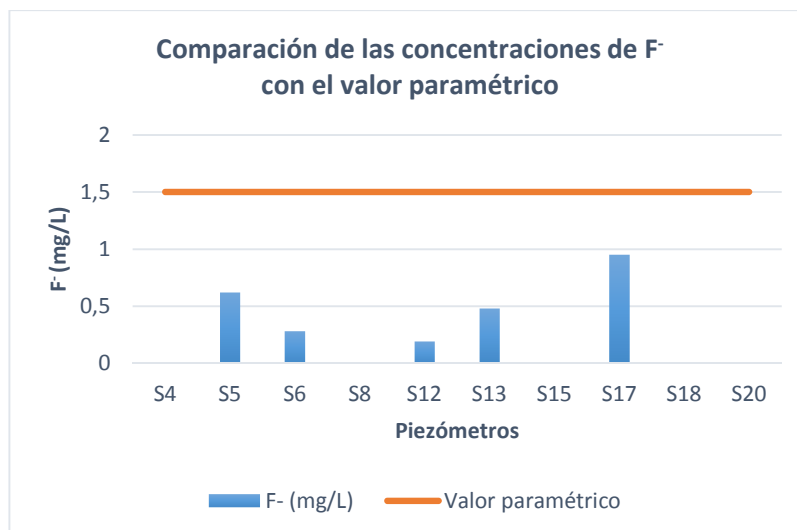


Figura 39.- Representación de la concentración del ion fluoruro (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el valor paramétrico fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

En las figuras 38 y 39 se puede observar que las concentraciones de fluoruros en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por debajo de los límites establecidos por los Decretos-Ley 236/98 y 306/07 para que el agua sea apta para el riego y para consumo humano, respectivamente. Por tanto, se trata de un agua **apta** para ambos usos en este aspecto.

### 3. Nitratos

El nitrógeno es un elemento no metálico presente en la naturaleza en forma gaseosa. En el medio acuático se puede encontrar como ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004). El nitrato representa la fase final de la oxidación de la materia orgánica y concentraciones superiores a 50 mg/L pueden indicar contaminación del agua subterránea por actividad humana (desechos orgánicos, depósitos de basura, fertilizantes o productos fitosanitarios nitrogenados, etc.) (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

De acuerdo con el Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98 sobre la calidad del agua destinada para el riego, el valor máximo recomendable (VMR) es de 50 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ . Por otro lado, según el Anexo VI del mismo Decreto, sobre la calidad del agua para consumo humano, el VMR es de 25 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  y el VMA de 50 mg/L, valor que permanece como valor paramétrico en los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, sobre los valores indicadores establecidos para efectos de control del agua destinada al consumo humano.

En la siguiente figura (Fig. 40) se puede observar que las concentraciones de nitratos en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas

en cada uno de los piezómetros, se encuentran por debajo del límite establecido por los Decretos para que el agua sea apta para el riego y para consumo humano. Por tanto, se trata de un agua **apta** para ambos usos en este aspecto.

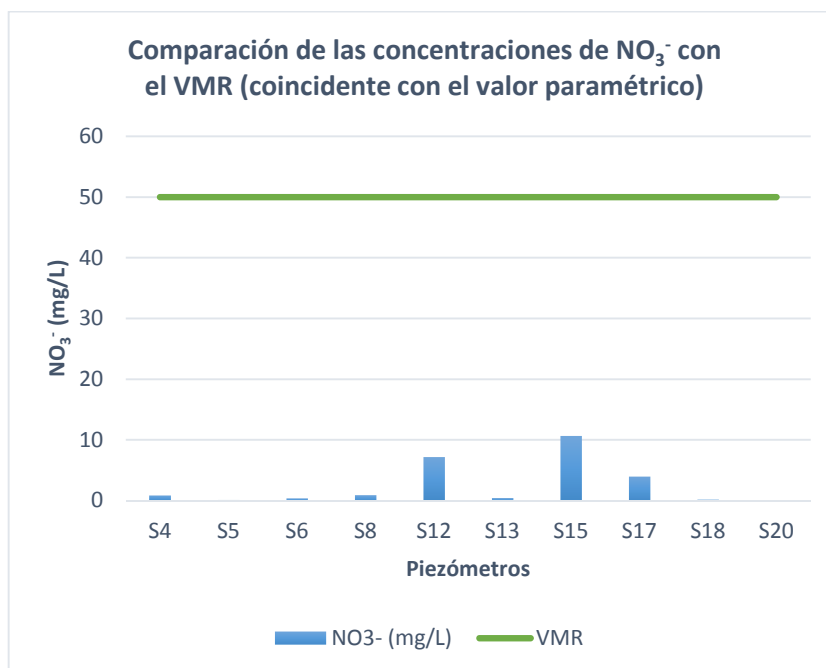


Figura 40.- Representación de la concentración del ion nitrato (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el VMR establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego, que coincide con el valor paramétrico fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

#### 4. Sulfatos

Los iones sulfato que circulan por las rocas cristalinas tienen su origen en la lixiviación de los terrenos formados en ambientes con índices de aridez elevados, en la oxidación del azufre presente en las rocas ígneas y metamórficas y en las actividades urbanas, agrícolas e industriales (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983). La concentración en sulfatos de las aguas naturales es muy variable debido principalmente a razones geológicas y suele encontrarse entre 30 y 300 mg/L (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004).

De acuerdo con el Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98 sobre la calidad del agua destinada para el riego, el valor máximo recomendable (VMR) es de 575 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Por otro lado, según el Anexo VI del mismo Decreto, sobre la calidad del agua para consumo humano, el VMR es de 25 mg/L de  $\text{SO}_4^{2-}$  y el VMA de 250 mg/L, valor que permanece como valor paramétrico en los Anexos I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, sobre los valores indicadores establecidos para efectos de control del agua destinada al consumo humano, que además establecen que el agua no debe ser agresiva para los materiales con los que entre en contacto.



En las siguientes figuras (Figs. 41 y 42) se puede observar que las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea, medidas en laboratorio en las muestras recogidas en cada uno de los piezómetros, se encuentran por debajo del límite establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego, sin embargo el piezómetro S17 sobrepasa el valor paramétrico establecido por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano. Por tanto, se trata de un agua **apta** para el riego pero no apta para consumo humano en este aspecto.

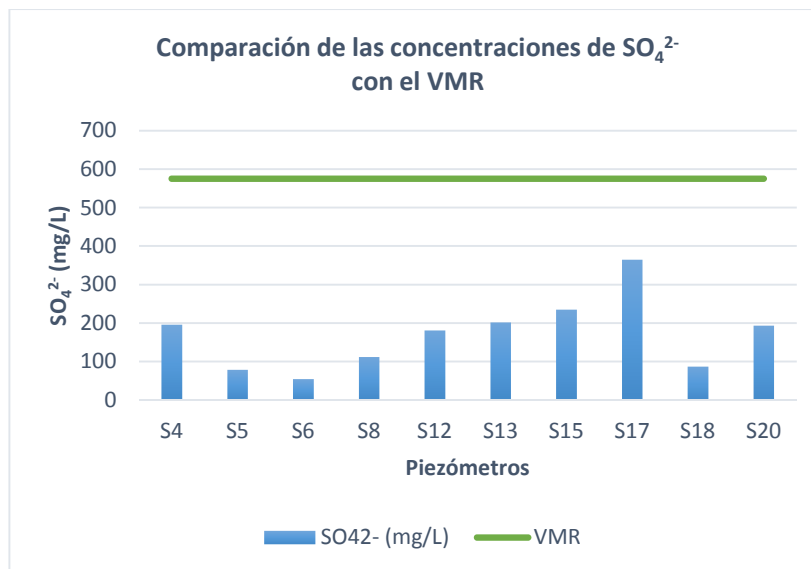


Figura 41.- Representación de la concentración del ion sulfato (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el VMR establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego.

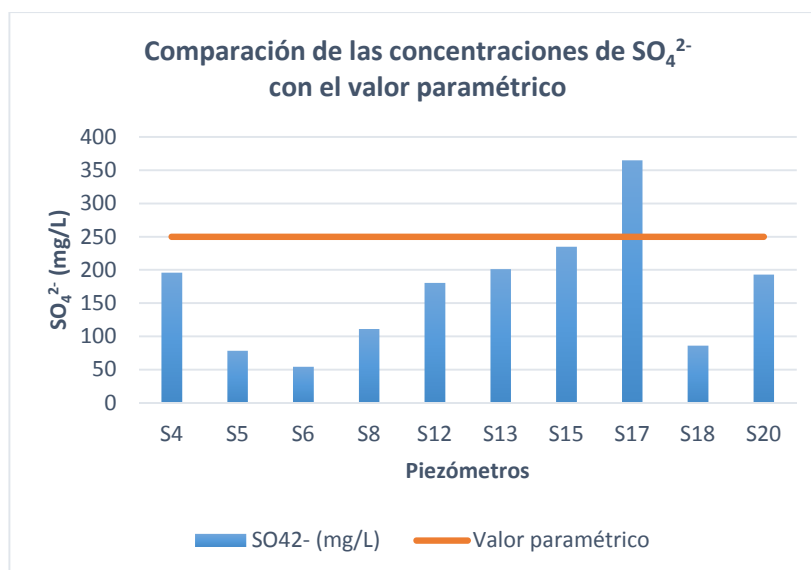


Figura 42.- Representación de la concentración del ion sulfato (mg/L) en las muestras de agua recogidas en los piezómetros, obtenida en laboratorio mediante cromatografía iónica, y comparación con el valor paramétrico fijado por el Decreto-Ley 306/07 para que un agua sea apta para el consumo humano.

#### iv. Error de balance

Para controlar la precisión de los resultados obtenidos en los ensayos de determinación de las concentraciones de cationes y aniones mayores, se procede al cálculo del error de balance. Para ello, es necesario transformar las concentraciones de los elementos determinadas en laboratorio en mg/L a meq/L mediante la ecuación de Stabler:

$$\text{Peso equivalente} = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia o número de electrones en juego en la reacción}}$$

$$\text{meq/L} = \frac{\text{mg/L}}{\text{Peso equivalente}}$$

Una vez determinadas las concentraciones en meq/L se puede calcular el error de balance mediante la siguiente expresión (Lloyd, J.W. y Heathcote, J.A., 1985):

$$\text{Error de balance (\%)} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \cdot 100$$

De acuerdo con el principio de electroneutralidad de Pauling, la suma de los iones positivos (cationes) debe ser igual a la suma de los iones negativos (aniones) en las diferentes muestras de agua obtenidas (error de balance de aniones y cationes nulo). De modo que si los errores de balance obtenidos tienen signo negativo, como es el caso en la mayor parte de las muestras (Tabla 15), quiere decir que la concentración de aniones dosificada en los análisis es superior a la concentración de cationes y al contrario si se obtienen los errores de balance con signo positivo.

Para la posterior realización de los diagramas del U.S. Salinity Laboratory Staff, Piper y Stiff, se deben tomar únicamente aquellas muestras cuyo error de balance de aniones y cationes sea menor al 10%. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos (Tabla 15) (Fig. 43) y el bajo número de muestras disponibles para la caracterización de la calidad del agua subterránea en el Jardín, se considera que todas las muestras tienen valores aceptables de error de balance, a pesar de que las muestras S4, S8 y S20 tienen valores ligeramente superiores al 10% (valor límite de referencia) (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

Tabla 15.- Concentraciones de aniones y cationes en meq/L y respectivo error de balance para cada una de las muestras recogidas en campo para cada piezómetro.

Piezómetros	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Σ cationes	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ aniones	Error de balance (%)
S4	5,19	8,19	0,05	2,38	15,81	14,22	0,00	1,39	0,01	4,08	19,70	-10,93
S5	5,59	3,80	0,09	1,23	10,71	10,11	0,03	1,28	0,00	1,63	13,05	-9,88
S6	5,99	2,00	0,07	1,21	9,27	9,09	0,01	1,05	0,01	1,12	11,28	-9,78
S8	5,39	4,40	0,07	2,44	12,30	11,56	0,00	1,70	0,01	2,32	15,58	-11,78
S12	5,79	3,80	0,08	3,47	13,14	9,91	0,01	1,79	0,12	3,76	15,59	-8,53
S13	5,99	4,40	0,13	4,17	14,68	11,67	0,03	1,88	0,01	4,19	17,78	-9,54
S15	6,87	5,52	0,12	6,32	18,81	11,46	0,00	2,33	0,17	4,89	18,85	-0,10
S17	8,78	6,19	0,18	3,94	19,10	8,72	0,05	2,10	0,06	7,60	18,53	1,50
S18	3,79	1,60	0,15	1,00	6,54	5,16	0,00	0,79	0,00	1,79	7,74	-8,44
S20	7,39	2,80	0,05	3,99	14,23	12,42	0,00	1,75	0,00	4,02	18,19	-12,22

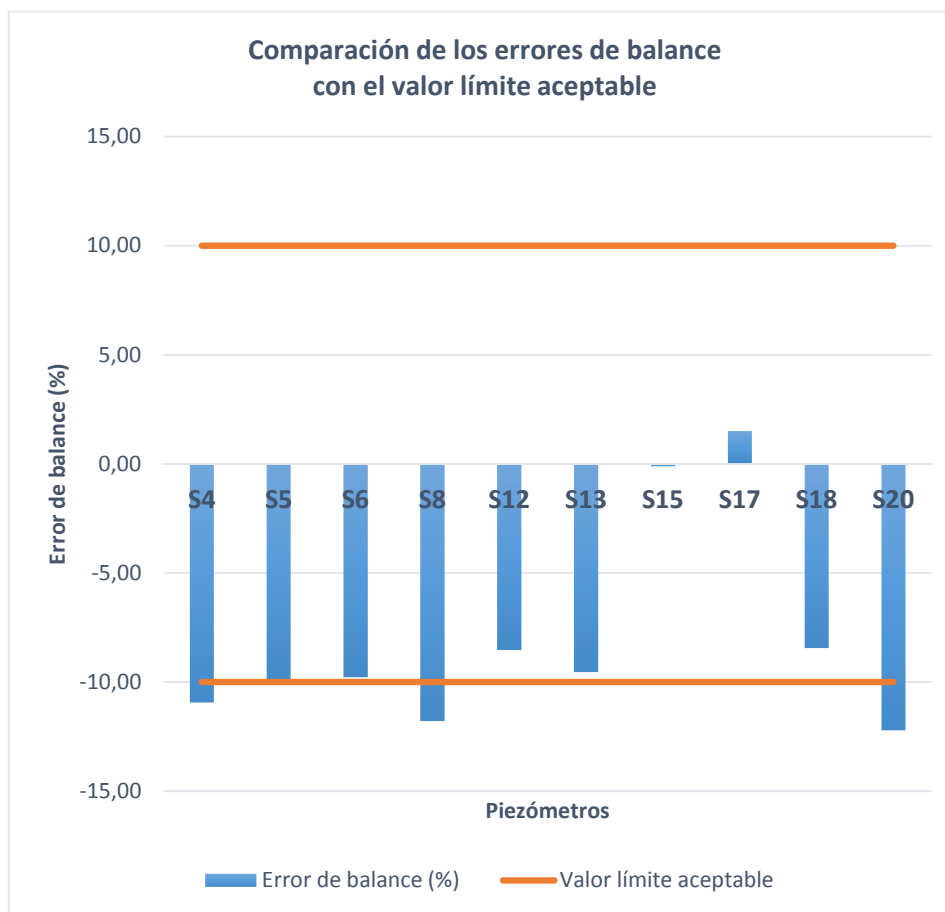


Figura 43.- Representación gráfica de los errores de balance (%) y comparación con el valor límite aceptable.

## 7. Análisis de los resultados

### a. Caracterización de la calidad del agua subterránea

De acuerdo con el Preámbulo de la Ley de Aguas (LA), *“el agua es un recurso natural único, escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades socioeconómicas, es irremplazable, no ampliable por la voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos”*. Tiene funciones ecológicas fundamentales que influyen en el ciclo de vida de todos los seres vivos. Sus fuentes de provisión son limitadas, su capacidad de renovación natural pequeña y sólo un escaso porcentaje del agua total existente en la Tierra está realmente disponible para las diferentes actividades (Balairón, L., 2010).

Debido a sus características físico-químicas, el agua no se encuentra en estado puro en la naturaleza. Las características físicas de las aguas subterráneas (color, turbiedad, temperatura, sólidos disueltos, etc.) no suelen plantear problemas debido al filtrado natural del terreno y a la regularidad térmica del subsuelo. Sin embargo, las características químicas del recurso dependen fundamentalmente de los materiales geológicos atravesados, grado de alteración de los mismos y tiempo de permanencia, es decir, son características más variables de unos acuíferos a otros, pudiendo encontrarse algunos iones en cantidades excesivas para algún uso determinado. Las aguas de mejor calidad son las procedentes de formaciones graníticas o carbonatadas de las facies químicas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. Las aguas procedentes de unidades detríticas resultan de peor calidad que las anteriores, aunque también suelen ser admisibles para todos los usos habituales del agua (Mendes, B. y Oliveira, J.F.S., 2004) (Balairón, L., 2010).

La aptitud de un agua para su utilización en los diferentes usos está directamente relacionada con el concepto de calidad. Cada país se encarga de fijar en sus normativas los requisitos de calidad mínimos que deben garantizarse en las aguas subterráneas en función del uso al que se vaya a destinar el recurso.

La calidad del agua subterránea es buena en general y prueba de ello es el uso que de ella se hace en la actualidad para abastecimiento y regadíos. Sin embargo, aunque el deterioro de estas aguas suele ser lento y zonal, lo que permite controlar la calidad y planificar soluciones alternativas, presenta el problema de que la alteración de la calidad sólo es detectable tras haber transcurrido bastante tiempo desde el inicio de la actividad contaminante (Balairón, L., 2010).

La degradación de la calidad de las aguas subterráneas depende principalmente de la vulnerabilidad de los acuíferos frente a las actividades potencialmente contaminantes que se desarrollan en su entorno. Los problemas más habituales y

cuya existencia va a ser determinada a continuación en la zona de estudio son los siguientes (Balairón, L., 1992):

- Filtraciones de aguas residuales, domésticas o industriales, debidas a vertidos directos, fugas de las redes de saneamiento, infiltraciones procedentes de fosas sépticas, lixiviados, rezumes de los residuos sólidos almacenados en vertederos, etc. Especialmente grave resulta el caso de la contaminación por metales pesados.
- Contaminación por nitratos o por compuestos orgánicos en zonas verdes como consecuencia de una utilización masiva de fertilizantes y productos fitosanitarios. Dependiendo de la concentración de éstos, se suele establecer la siguiente clasificación:
  - Zonas con contaminación incipiente, con concentraciones de nitratos entre 20 y 50 mg/L.
  - Zonas con contaminación establecida, con concentraciones entre 50 y 100 mg/L.
  - Zonas con alto grado de contaminación, con concentraciones superiores a los 100 mg/L.
- Intrusión marina en los acuíferos costeros, con el correspondiente peligro de salinización del terreno. Surge como consecuencia de la explotación del acuífero o en épocas de sequía; el descenso del nivel piezométrico cuando los volúmenes de agua extraídos son superiores a las recargas o como consecuencia de períodos de estiaje, provoca la salinización del acuífero como resultado del avance del agua marina tierra adentro. Se pueden dar cuatro situaciones diferentes: acuíferos donde no se detecta intrusión, acuíferos donde se presenta de forma puntual, acuíferos donde se presenta de forma zonal y acuíferos donde se presenta de forma general.

En el presente estudio, se ha evaluado la calidad del agua subterránea del Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa con el objetivo de determinar su aptitud para su utilización en el riego del mismo y para el consumo humano. Para conseguir esta caracterización se ha consultado la normativa portuguesa referente a los requisitos de calidad mínimos que deben garantizarse en el agua para los diferentes usos y se ha empleado el software Aquachem para la obtención de diagramas y clasificaciones del agua de acuerdo a sus facies químicas y concentraciones de cationes y aniones mayores.

#### **i. Software Aquachem**

Se trata de un programa diseñado por Waterloo Hydrogeologic para realizar análisis numéricos y gráficos que permiten interpretar los resultados de los análisis físico-químicos de laboratorio, especialmente y en este caso para determinar la calidad del agua subterránea (Villegas, P., 2011).



El análisis de datos con Aquachem abarca una amplia gama de funcionalidades y cálculos incluyendo conversiones de unidades, balances de carga, comparación de las muestras, estadísticas, análisis de tendencias, etc. (Cox, C., 2006). También posee una base de datos personalizable de normas de calidad de agua con hasta tres niveles diferentes de acción para cada parámetro, de forma que todas las muestras que superan el estándar seleccionado se resaltan automáticamente en color rojo para poder identificar y calificar fácilmente los problemas potenciales de las muestras de agua (Villegas, P., 2011).

Estas capacidades de análisis se complementan con una amplia selección de gráficos que representan las características químicas de los datos de calidad del agua subterránea (Villegas, P., 2011). En el presente análisis se obtendrán los diagramas del U.S. Salinity Laboratory Staff, Piper y Stiff, muy convenientes para representar la información química obtenida previamente en laboratorio para cada una de las muestras de agua, poder clasificarla de acuerdo a sus facies químicas y concluir su aptitud para el riego del Jardín Botánico y para el consumo humano.

## ii. Clasificación del agua según el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff

La calidad del agua para el riego depende principalmente de su composición química, alcalinidad, salinidad, contenido de boro y relación de adsorción del sodio (SAR) (Balairón, L., 2010). Para la clasificación de las muestras de agua subterránea en función de la existencia de peligros potenciales de alcalinización (sodificación) y salinización del terreno se ha utilizado el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff, que define la aptitud de un agua para el riego con base en su relación de adsorción del sodio (SAR) y en su conductividad eléctrica (CE) (Fig. 44).

De acuerdo con el diagrama obtenido (Fig. 45), el agua subterránea presenta un **riesgo de salinidad medio-alto**, encontrándose sus índices comprendidos entre **S1-C2** y **S1-C3**. El significado de estas siglas es el siguiente (Balairón, L., 2010):

- S1 Se trata de un agua con baja concentración de sodio, es decir, puede utilizarse para el riego en la mayoría de los suelos con escasa probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable – **bajo peligro de alcalinización** (sodificación) del terreno.
- C2 Agua con **nivel de salinidad medio**, es decir, podrá utilizarse siempre que haya un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad se pueden cultivar plantas moderadamente tolerantes a las sales.

C3 Agua de **salinidad alta**. No debe utilizarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente y, aún con un drenaje adecuado, se pueden necesitar prácticas especiales de control de la salinidad, debiendo **seleccionar únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a las sales**.

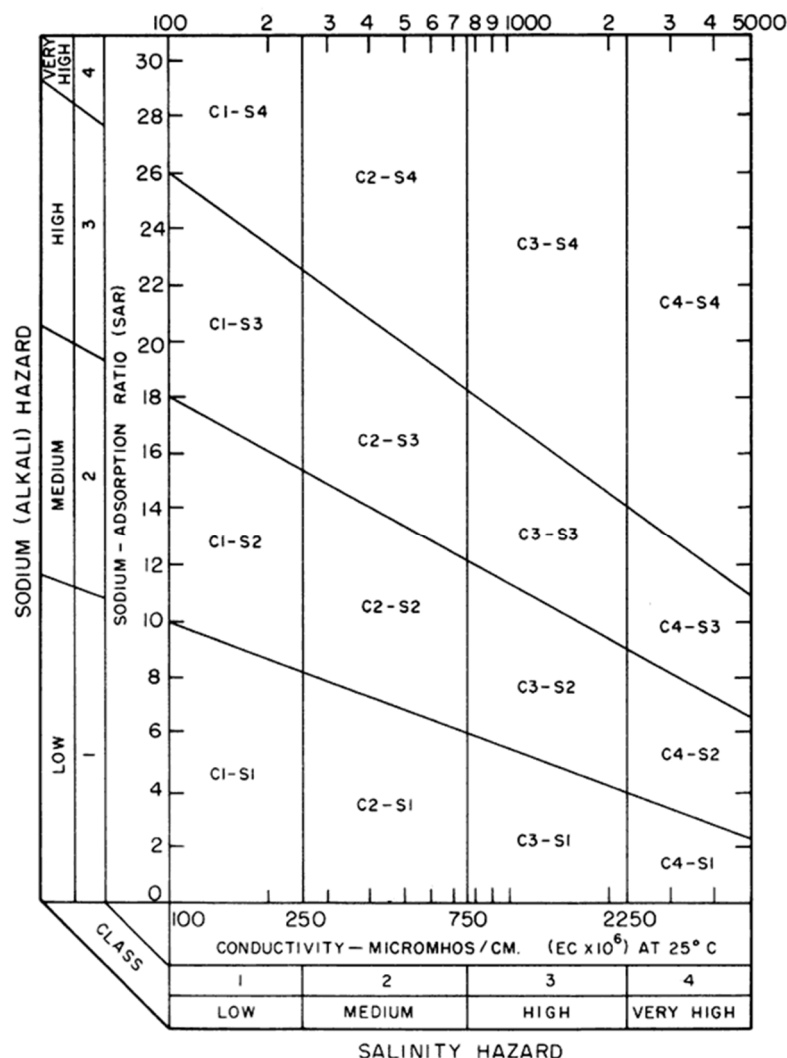


Figura 44.- Ilustración de un diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff y clasificación del agua en los diferentes tipos en función de la existencia de peligros potenciales de alcalinización y salinización del terreno.

Como se puede observar en el diagrama siguiente (Fig. 45), todas las muestras de agua presentan peligro de alcalinización bajo (S1) y peligro de salinización alto (C3), excepto en el piezómetro S18 donde este último peligro es medio (C2). Se concluye que estas aguas no deben ser utilizadas para el riego excepto en los casos en que las plantas presenten una elevada tolerancia a la salinidad, ya que la zona presenta una contaminación de tipo general de intrusión salina (peligros de salinización del tipo C2 y C3).

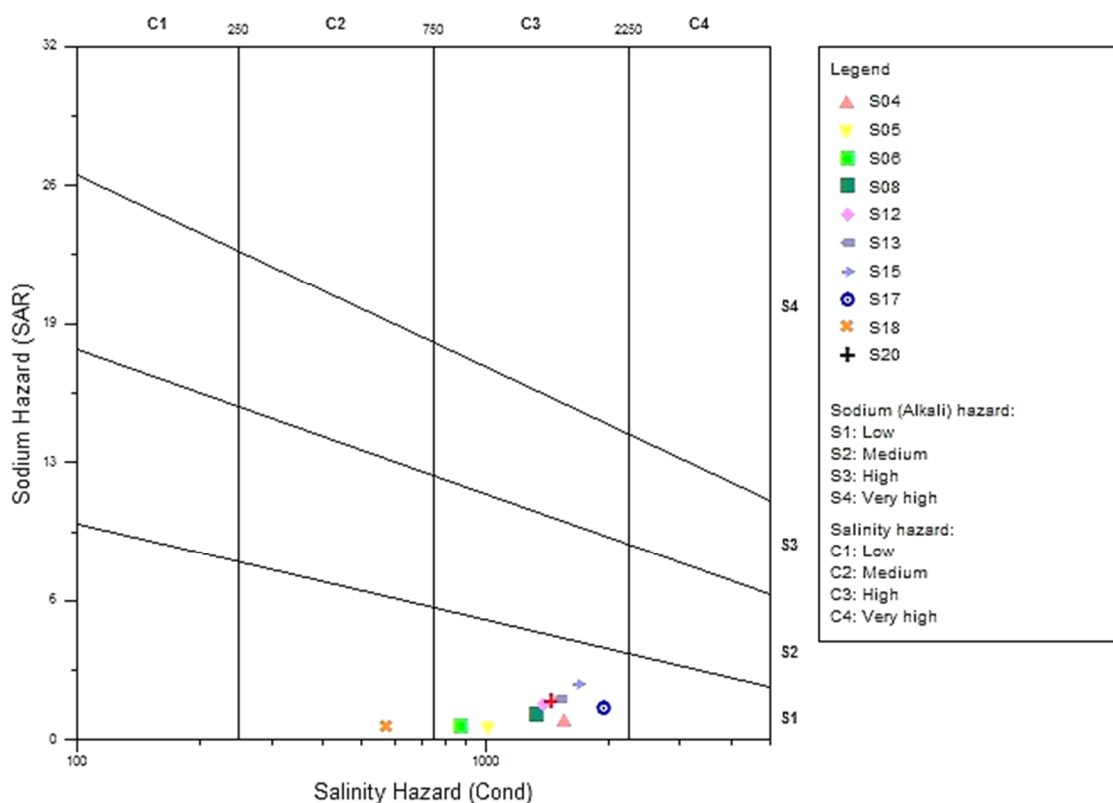


Figura 45.- Proyección en el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff de las muestras de agua subterránea recogidas en campo en cada piezómetro (Adaptada del software Aquachem 5.1, 2015).

### iii. Clasificación del agua según el diagrama de Piper

Se trata de uno de los gráficos más utilizados ya que permite agrupar aguas geoquímicamente similares en áreas bien definidas. Es útil porque permite: visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas, detectar procesos como el intercambio iónico, detectar mezclas entre dos tipos de agua y detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas (Villegas, P., 2011).

Estos diagramas, también conocidos como trilineales, son generados dibujando las proporciones (con los datos de partida en miliequivalentes por litro de cada ion) de los cationes mayores ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) en un diagrama triangular, las proporciones de los aniones mayores (alcalinidad, cloruro y sulfato) en otro y combinando la información de los dos triángulos en un cuadrilátero (Fig. 46) (Cox, C., 2006).

Para dibujar este diagrama partimos de las concentraciones (en mg/L) de los cationes y aniones mayores obtenidas en laboratorio. En primer lugar, hay que convertir estas concentraciones en equivalentes (meq/L). Posteriormente, se determina la proporción de cada ion, sabiendo que los cationes y los aniones deben sumar un 100% cada uno y que las concentraciones de sodio y potasio deben ser sumadas. Estas proporciones calculadas ya pueden ser dibujadas en los gráficos triangulares, de modo que estos triángulos muestran sólo las proporciones entre los

aniones o los cationes mayores, pero no sus concentraciones. La información de los triángulos es transferida al cuadrilátero proyectando una línea paralela al eje del magnesio para el punto de la izquierda y una línea paralela al eje del sulfato para el punto de la derecha. La intersección de estas dos líneas será la información en el cuadrilátero, que combina información de los cationes y aniones (Fig. 46) (Cox, C., 2006).

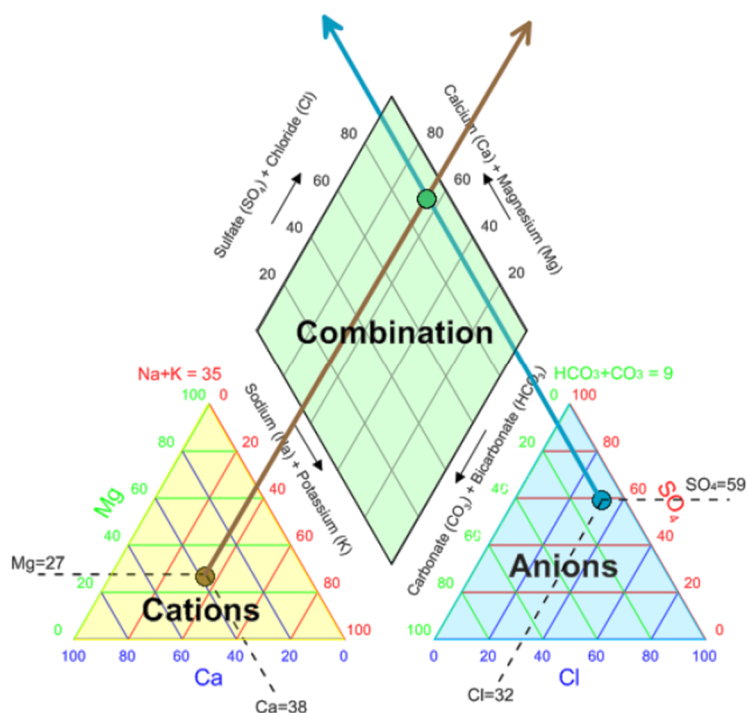


Figura 46.- Ilustración de un diagrama de Piper. El triángulo de la izquierda es el de los cationes. La esquina superior de ese triángulo corresponde a un 100% de  $Mg^{2+}$ . En el cuadrilátero la esquina izquierda representa un 100% de  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ , 0% de  $(Na^{+} + K^{+})$ , 100% de alcalinidad y 0% de  $(SO_4^{2-} + Cl^{-})$ . El triángulo de la derecha es el de los aniones. La esquina superior de ese triángulo es un 100% de  $SO_4^{2-}$ . En el cuadrilátero la esquina derecha corresponde a un 0% de  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ , 100% de  $(Na^{+} + K^{+})$ , 0% de alcalinidad y 100% de  $(SO_4^{2-} + Cl^{-})$ . La alcalinidad es en general  $HCO_3^{-} + CO_3^{2-}$ .

La mayor utilidad de los diagramas de Piper es representar gráficamente la información de los análisis químicos del agua para clasificarla en diferentes tipos. Se puede determinar a qué grupo hidroquímico pertenece una muestra de agua simplemente fijándose en la parte del cuadrilátero en que se encuentra, aunque resulta más fácil clasificar la muestra utilizando las divisiones de los dos triángulos (Fig. 47) (Cox, C., 2006).

Analizando el diagrama de Piper obtenido, la posición de las muestras de agua en el cuadrilátero y en los triángulos (Fig. 48) y las facies químicas obtenidas para las muestras de agua a partir de las concentraciones de cationes y aniones mayores determinadas en laboratorio (Tabla 16), se puede concluir que el agua subterránea estudiada es mayoritariamente **bicarbonatada cálcica y magnésica**, existiendo sólo una muestra, la obtenida en el piezómetro S17, que presenta una facie

Diagrama de clasificación de aguas minerales de la Asociación Internacional de Química Analítica (IAPAC). El diagrama está dividido en tres triángulos principales que representan las relaciones entre los iones calcio, magnesio y sodio. Los ejes de los triángulos están etiquetados con porcentajes de iones y relaciones químicas. Las zonas de clasificación incluyen: SULFATADAS Y/O CLORURADAS CALCICAS Y/O MAGNESICAS, BICARBONATADAS CALCICAS Y/O MAGNESICAS, CLORURADAS Y/O SULFATADAS SODICAS, BICARBONATADAS SODICAS, TIPO MAGNESICO, TIPO CALCICO, TIPO SODICO, TIPO BICARBONATADO, TIPO CLORURADO, TIPO INTERMEDIOS, TIPO SULFATADO, y TIPO INTERMEDIOS. Se incluyen también las relaciones químicas:  $r(Na+K)$ ,  $r(HCO_3+CO_3)$ , y  $r(Ca+Mg)$ .

Tabla 16.- Clasificación según la facie hidroquímica predominante de las muestras de agua subterránea, obtenida a partir de las proporciones de cationes y aniones (en tanto por ciento a partir de las concentraciones en meq/L) determinadas para cada una de las muestras considerando que tienen que sumar un 100% cada uno.

67



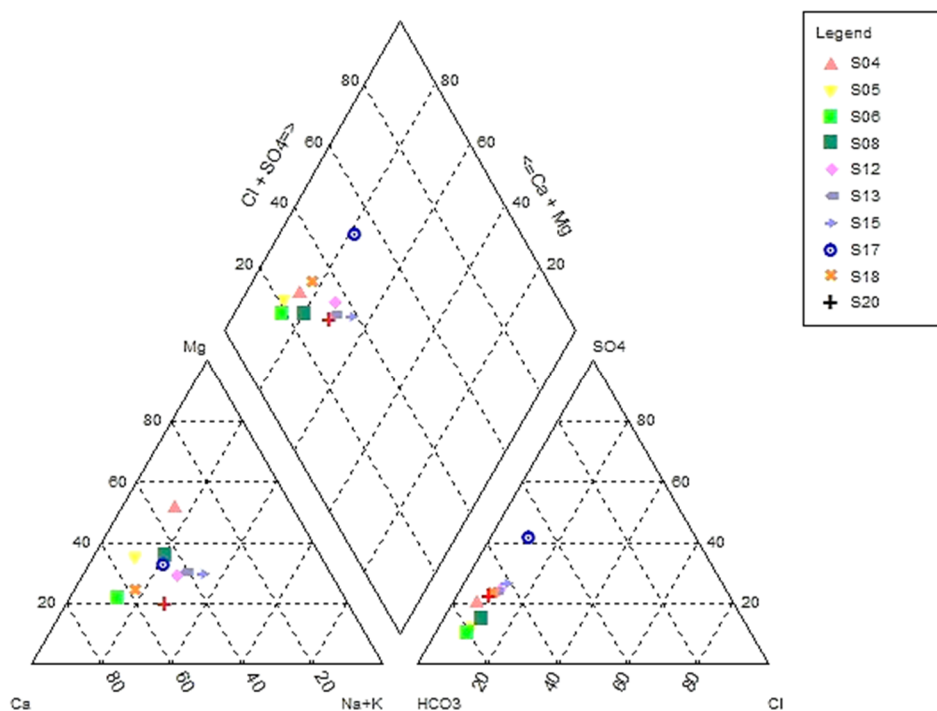


Figura 48.- Proyección en el diagrama de Piper de las muestras de agua subterránea recogidas en campo en cada piezómetro, obtenido a partir de las concentraciones de cationes y aniones mayores determinadas en laboratorio para cada una de las muestras (Adaptada del software Aquachem 5.1, 2015).

#### iv. Clasificación del agua según los diagramas de Stiff

Se trata de polígonos, uno para cada muestra, que generalmente se sitúan sobre un mapa para mostrar la distribución geográfica de la composición del agua. Están compuestos por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen en el lado izquierdo del diagrama y los aniones en el derecho. Siempre el  $\text{Na}^+$  se confronta con el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  con el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  con el  $\text{SO}_4^{2-}$  (a veces también se pueden representar otros dos iones, como el  $\text{Fe}^{2+}$  contra el  $\text{NO}_3^-$ ). Todos los ejes horizontales deben tener la misma escala lineal, que se determinará según la salinidad de las aguas de la región estudiada, y las concentraciones deben estar expresadas en miliequivalentes por litro. Se sitúan las concentraciones en cada uno de los seis ejes y posteriormente se unen formando un polígono. La gran importancia de este diagrama se debe a que permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con su configuración particular del polígono) y, por lo tanto, permite apreciar fácilmente las semejanzas y diferencias entre los polígonos que se muestran en el mismo mapa. Además, de forma simultánea, permite adquirir una idea del grado de mineralización de las muestras en función del ancho del polígono. En los siguientes diagramas se pueden observar diferentes apreciaciones (Fig. 49) (Villegas, P., 2011) (Sánchez, F.J., 2015). Como se puede observar en los diagramas de Stiff obtenidos para las muestras de agua analizadas, todos ellos presentan la primera configuración, en forma de punta de flecha, característica de las aguas subterráneas naturales (Fig. 50) (Anexo I).

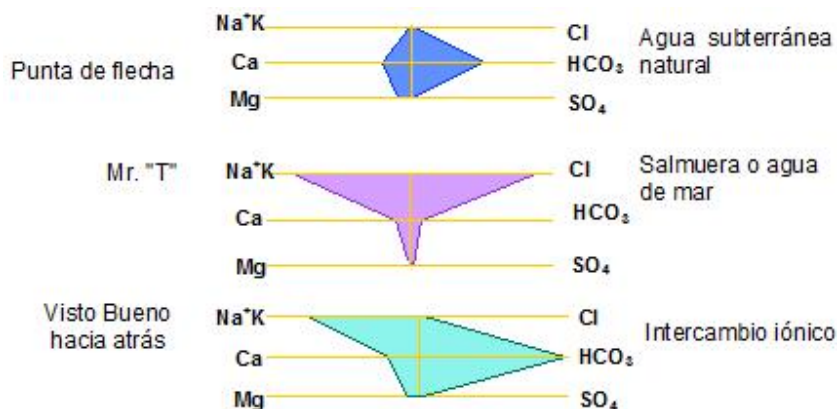


Figura 49.- Apreciaciones específicas que se pueden observar en los diagramas de Stiff en función de su configuración.

Analizando los diagramas de Stiff obtenidos (Fig. 50) (Anexo I) se puede observar que para todas las muestras **el  $\text{HCO}_3^-$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  son el anión y los cationes predominantes**, lo que refuerza la conclusión obtenida a partir del diagrama de Piper sobre la facie química predominante del agua subterránea estudiada (bicarbonatada cálcica y magnésica).

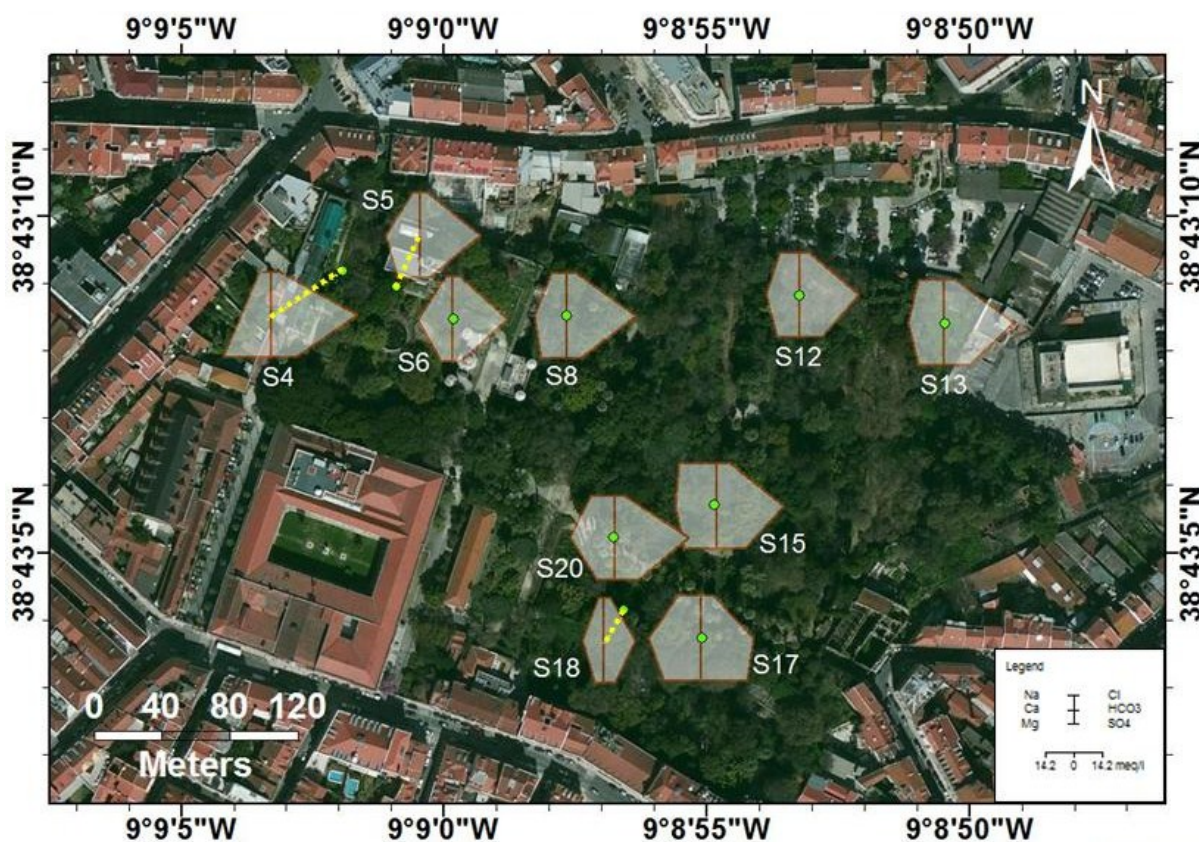


Figura 50.- Proyección de los diagramas de Stiff en los respectivos locales de recogida de las muestras, con el objetivo de poder observar la distribución geográfica de la composición del agua (Adaptada de ArcGis, 2015).

Las principales singularidades que se pueden observar en los diagramas son: en el piezómetro S4 una alta concentración de magnesio, probablemente causada por una mala ejecución de la fase de limpieza y desarrollo para la instalación del piezómetro (entubamiento) después del sondeo y en el piezómetro S17 una elevada concentración de sulfato, generalmente provocada por un elevado uso de fertilizantes y productos fitosanitarios.

#### **v. Clasificación del agua según los valores patrón establecidos por los Decretos-Ley**

De acuerdo con el artículo 14º del Decreto-Ley 236/98, de 1 de Agosto, las aguas subterráneas serán consideradas en conformidad con la normativa de calidad fijada en los artículos siempre que los valores de los parámetros determinados entre el día 1 de Octubre de cada año y el día 30 de Septiembre del año siguiente (año hidrológico) muestren que las aguas satisfacen los valores normativos:

- En el 95% de las muestras, relativamente a los parámetros con valores especificados en las columnas VMA (valor máximo admisible).
- En el 90% de las muestras en los restantes casos, teniendo en cuenta que valores más elevados que los VMR (valor máximo recomendado) no implican necesariamente que el agua sea impropia para su uso.
- Para los restantes 5 y 10% de las muestras se debe verificar que:
  - Los valores observados no presentan un desvío superior al 50% del valor de los parámetros en cuestión, excepto en lo que se refiere a la temperatura, pH, oxígeno disuelto y parámetros microbiológicos, que no pueden presentar ningún desvío.
  - No suponen ningún riesgo para la salud pública.

La determinación de la aptitud del agua para su uso en el regadío y para consumo humano es hecha mediante la comparación de los resultados obtenidos en las muestras de agua analizadas en campo y en laboratorio con los valores patrón (valores máximos recomendados – VMRs – y valores máximos admisibles – VMAs) establecidos por los Decretos-Ley 236/98, 243/01 y 306/07 (Anexos II y III).

#### **Calidad del agua para el riego**

Los elevados valores de conductividad eléctrica obtenidos en todas las muestras, aunque cumplen con el límite máximo admisible fijado por el Decreto-Ley 306/07, sugieren influencia de contaminación en el agua subterránea, probablemente debido a tratarse de una zona intensamente urbanizada en la cual han influido factores como infiltración de efluentes domésticos e industriales resultantes de pérdidas en las redes de recogida y transporte, infiltración de aguas pluviales e infiltración del agua de limpieza de los pavimentos, que arrastra consigo todas las sustancias contaminantes presentes en la superficie.

En cuanto a las concentraciones de aniones mayores, se puede afirmar que la calidad del agua para el riego es buena, excepto en los piezómetros S15 y S17, donde se verifica la presencia de cloruros ligeramente en exceso con respecto al VMR establecido en la normativa, probablemente debido a alguna contaminación resultante del uso de fertilizantes en exceso en el Jardín o como consecuencia de la infiltración de efluentes urbanos o industriales. Como establece el Decreto-Ley 236/98 en su artículo 14º, valores más elevados que los VMR no implican necesariamente que el agua sea impropia para su uso, por lo que se asigna a estas muestras de agua una calidad media. Además, se puede afirmar que no hay contaminación por nitratos porque este tipo de contaminación comienza a concentraciones de 20 mg/L y la mayor concentración presente en el Jardín se da en piezómetro S15 y es del orden de los 10 mg/L, por lo que se puede concluir que no ha habido una utilización masiva de fertilizantes y productos fitosanitarios.

Por otro lado, los elevados valores de alcalinidad que se determinaron en laboratorio con respecto al promedio general establecido por el IGME para las aguas subterráneas (de 100 a 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ) hacen necesaria la clasificación de las muestras de agua en función de su índice SAR y su conductividad eléctrica – diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff (Fig. 45) – para determinar peligros potenciales de salinización y alcalinización del terreno al usar este agua para el riego. En cuanto a las concentraciones de cationes mayores, se puede observar que las muestras de agua presentan elevadas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en contraste con bajas concentraciones de  $\text{Na}^+$ , lo cual va a implicar la obtención de un bajo índice SAR (relación de adsorción del sodio) y, por tanto, un bajo peligro de sodificación (agua del tipo S1). A continuación, se determinan los distintos índices SAR para las muestras de agua y se comparan con el VMR establecido por el Anexo XVI del Decreto 236/98 sobre la calidad de las aguas destinadas al riego. Como se podía observar en el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff, todas las muestras de agua presentan peligro de salinización alto, excepto en el piezómetro S18 donde el peligro es medio. Estas aguas no deben ser utilizadas para el riego excepto en los casos en que las plantas presenten una elevada tolerancia a la salinidad, aunque el peligro de alcalinización (sodificación) sea bajo, tal como se puede observar en los resultados obtenidos (Tabla 17).

El índice SAR (relación de adsorción del sodio) se determina mediante la siguiente expresión:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  expresadas en meq/L.



Tabla 17.- Comparación de los valores determinados del índice SAR para cada una de las muestras de agua con el VMR establecido por el Decreto-Ley 236/98 para que un agua sea apta para el riego.

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	SAR
VMR	-	-	-	<b>8</b>
VMA	-	-	-	-
<b>S4</b>	5,19	8,19	2,38	0,92
<b>S5</b>	5,59	3,80	1,23	0,57
<b>S6</b>	5,99	2,00	1,21	0,61
<b>S8</b>	5,39	4,40	2,44	1,11
<b>S12</b>	5,79	3,80	3,47	1,59
<b>S13</b>	5,99	4,40	4,17	1,83
<b>S15</b>	6,87	5,52	6,32	2,54
<b>S17</b>	8,78	6,19	3,94	1,44
<b>S18</b>	3,79	1,60	1,00	0,61
<b>S20</b>	7,39	2,80	3,99	1,77

Como conclusión, la calidad del agua subterránea del Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa para el riego es **buena** excepto en los piezómetros S15 y S17, donde las muestras presentan concentraciones ligeramente elevadas de cloruros. Sin embargo, debido al peligro potencial de salinización que presenta para el terreno, sólo será **aplicable en plantas con alta tolerancia a las sales**. Esto es causado principalmente por el carácter costero del área de estudio, que provoca un alto peligro de intrusión salina en el acuífero ante un período de sequía.

### Calidad del agua para consumo humano

La aptitud del agua para consumo humano es determinada fundamentalmente a partir de los parámetros químicos e indicadores establecidos en el Anexo I del Decreto-Ley 306/07. Se concluye que la calidad del agua subterránea para consumo humano es únicamente buena en una de las muestras, la recogida en el piezómetro S18. Como se puede observar en la tabla (Anexo II), la calidad del agua recogida en el resto de los piezómetros varía entre **mala** (muestras S4, S13, S15 y S17) y **media** (muestras S5, S6, S8, S12 y S20), principalmente como consecuencia de las elevadas concentraciones de los cationes Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> y, con ello, de valores de dureza superiores al límite fijado por la normativa.



## **b. Caracterización de la piezometría. Identificación de variaciones eventuales y causas respectivas mediante la instalación de transductores de presión**

Los transductores de presión son dispositivos automáticos que convierten la presión atmosférica en una señal eléctrica análoga. Estos aparatos fueron utilizados para registrar la variación del nivel del agua en los dos piezómetros elegidos para su instalación, los piezómetros S4 y S12, para disponer de este análisis en los piezómetros situados a la mayor y menor elevación en el Jardín, respectivamente.

Durante su instalación fue medida la profundidad del nivel del agua en cada piezómetro, de forma que el dispositivo fuese colocado a una profundidad considerablemente superior y permaneciese sumergido durante el tiempo de medición.

La colocación de los transductores queda representada en los esquemas del Anexo IV. Como se puede observar, fueron instalados en los piezómetros S4 y S12, con cotas de boca de 77,09 m y 43,21 m, respectivamente (Geotest, 2011). La profundidad del nivel del agua medida durante la colocación de los transductores fue de 7,19 m y 6,85 m (en comparación con las profundidades de 7,25 m – mayor – y 6,54 m – menor – medidas en la primera salida de campo de Marzo de 2015). El nivel piezométrico puede ser obtenido fácilmente mediante la diferencia entre la cota de boca y la profundidad del agua en cada piezómetro, obteniendo valores de 69,9 m y 36,36 m. Por su parte, los transductores fueron instalados a las profundidades de 10,34 m y 11,94 m, superiores a las correspondientes profundidades del nivel del agua.

El registro de la variación del nivel hidrostático (NHE) y su dependencia directa con las precipitaciones atmosféricas fue realizado durante 2 meses y 1 día, del 20/03/15 al 21/05/15, y los datos obtenidos fueron tratados y registrados obteniendo los gráficos que se muestran en los Anexos V y VI.

Como se puede observar en las figuras obtenidas, los diversos episodios de precipitación (picos azules que se pueden observar en el gráfico) inducen una variación del nivel hidrostático en los piezómetros, aumentando la cota del nivel del agua (línea verde del gráfico), lo que demuestra la dependencia entre la variación del nivel del agua subterránea y la precipitación atmosférica. Se verifica un desfase temporal de aproximadamente 1 día de respuesta del NHE relativamente a los diferentes períodos de precipitación. Este comportamiento puede ser explicado por la baja conductividad hidráulica del área estudiada determinada mediante ensayos “Slug Test”, que presenta valores máximos de  $3,08 \times 10^{-6}$  y valores mínimos de  $5,57 \times 10^{-8}$  m/s (Silva, M.C.R. y Medeiros, A., 2011).

El período de máxima precipitación se da durante las dos primeras semanas que estuvieron instalados los transductores, del 21/03/15 al 04/04/15, con un máximo el día 31/03, en el que se registró una precipitación de 59,7 mm. Este período de precipitaciones provocó la subida del nivel del agua subterránea en los piezómetros,

registrándose un máximo de 71,11 m el día 02/04 en el piezómetro S4 y un máximo de 36,89 m el día 06/04 en el piezómetro S12. Al final del período de instalación de los transductores, el día 21/05, se registraron los niveles piezométricos de 68,84 m en el piezómetro S4 y 35,43 m en el S12, valores inferiores a los iniciales debido a la escasez de períodos de precipitación durante los meses de Abril y Mayo.

### c. Potencial hidrogeológico del Jardín Botánico

De manera complementaria al estudio de la calidad del agua subterránea para el riego en el Jardín Botánico, se ha evaluado la cantidad del recurso realmente disponible y adecuado para ese fin.

Para poder desarrollar esta evaluación, se obtuvieron los volúmenes aproximados de agua consumidos exclusivamente para el riego del Jardín durante el período de 2008-2013 (Rectoría de la Universidad de Lisboa, 2015) (Tabla 18), representados en los gráficos siguientes a escala mensual y anual (Figs. 51 y 52).

Tabla 18.- Datos de volúmenes de agua (m<sup>3</sup>) aproximados consumidos para el riego en el Jardín Botánico durante el período de 2008-2013 (Adaptado de Rectoría de la Universidad de Lisboa, 2015).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>2008</b>	62	93	244	64	689	1195	1133	425	53	43	828	145
<b>2009</b>	30	54	51	111	319	689	1384	983	133	30	49	82
<b>2010</b>	37	48	29	513	689	1214	1620	811	69	71	37	19
<b>2011</b>	6	1	4	9	588	1667	1599	962	513	141	36	58
<b>2012</b>	37	97	87	148	567	1776	1816	1171	292	14	20	382
<b>2013</b>	0	3	1	311	919	3073	2802	1616	341	3	7	72
<b>Media</b>	28,67	49,33	69,33	192,67	628,50	1602,33	1725,67	994,67	233,50	50,33	162,83	126,33

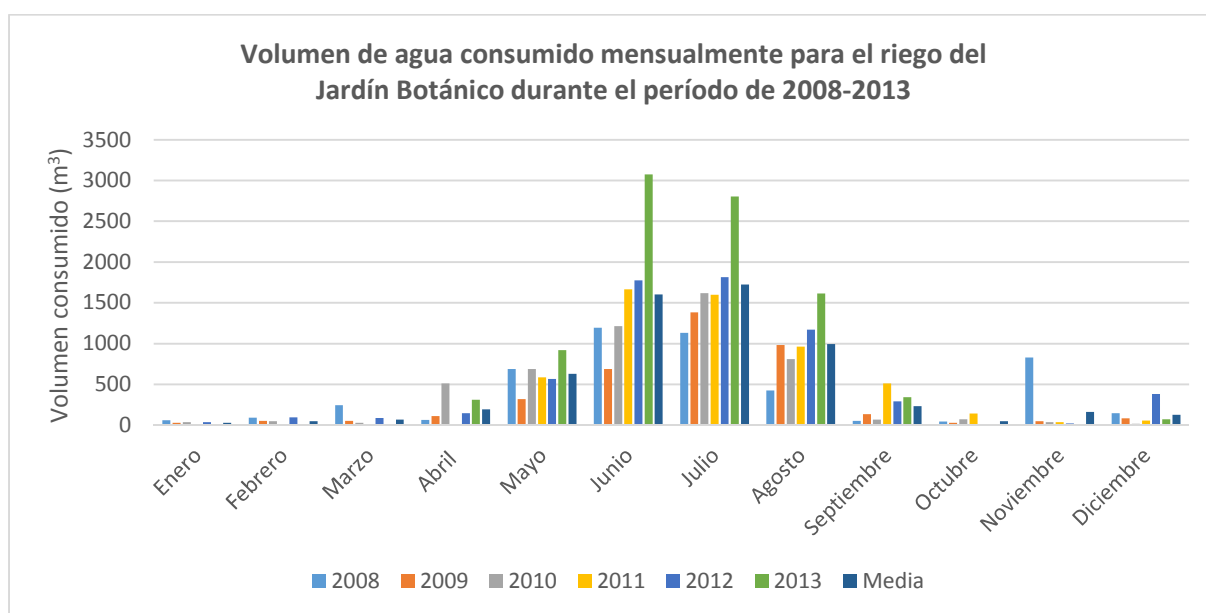


Figura 51.- Representación del consumo mensual aproximado de agua para el riego en el Jardín Botánico durante el período de 2008-2013.

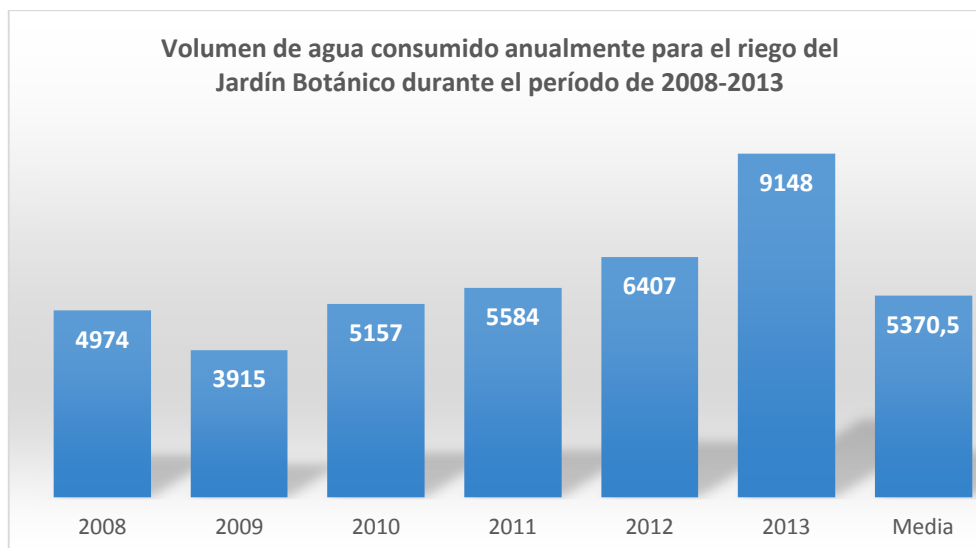


Figura 52.- Representación del consumo anual aproximado de agua para el riego en el Jardín Botánico durante el período de 2008-2013.

Como se puede observar en la figura 51, el consumo de agua es mayor en los meses más calurosos, en concreto en el período de Mayo a Agosto, meses en los que la precipitación atmosférica no consigue satisfacer en gran porcentaje las necesidades hídricas de las plantas y, por ello, se precisa recurrir en mayor medida al consumo del agua procedente de las redes de distribución.

También se puede verificar en la figura 52 que el consumo anual de agua para el riego del Jardín ha ido aumentando progresivamente durante el período de 2008 a 2013, lo que posibilita la necesidad de implantar un Programa de Ahorro de Agua con el objetivo de reducir la demanda y mejorar la eficiencia en el uso del recurso mediante: la concienciación de los usuarios de que se puede obtener un mismo nivel de calidad en el riego consumiendo menos agua, introducción de modificaciones técnicas en los equipos de consumo para mejorar la eficiencia de las actuales redes de riego y minimizar el problema de los retornos en el uso agrícola (en este uso, debido a las pérdidas por infiltración en el terreno y a la antigüedad de las redes de riego existentes, el valor de los retornos de agua es mucho menor que en cualquier otro uso del agua, con un valor medio de un 20%) o mediante la implantación de nuevos sistemas de riego más sofisticados y eficientes como los riegos localizados por goteo. En los usos agrícolas se debe conseguir un aumento de las tres eficiencias: de la conducción, de la distribución y de la aplicación.

Una vez conocidos los volúmenes de agua necesarios para satisfacer la demanda de regadío en el Jardín, se determinaron parámetros hidrogeológicos esenciales para poder establecer una relación entre la cantidad de agua subterránea disponible y el volumen necesario para el riego. Concretamente, se determinaron la conductividad hidráulica y la transmisividad en los locales de instalación de los piezómetros con el objetivo de estudiar su aptitud para la implementación de captaciones, obteniéndose un mayor potencial hidrogeológico del Jardín cuanto mayores sean estos parámetros.

Los valores de conductividad hidráulica de los piezómetros fueron obtenidos de los ensayos de permeabilidad “Slug Test” realizados por la empresa Grandewater en 2011 (Tabla 19). Se verifica que estos valores corresponden a una conductividad hidráulica clasificada como baja a muy baja (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

Tabla 19.- Valores de conductividad hidráulica obtenidos por ensayos “Slug Test” (Adaptado de Grandewater, 2011).

Piezómetros	Conductividad hidráulica	
	K (m/s)	K (cm/s)
S4	1,08E-07	1,08E-05
S5	6,08E-08	6,08E-06
S6	4,39E-07	4,39E-05
S8	5,57E-08	5,57E-06
S12	3,08E-06	3,08E-04
S13	1,62E-07	1,62E-05
S15	1,12E-07	1,12E-05
S18	1,75E-06	1,75E-04
S20	2,40E-07	2,40E-05
Media	6,68E-07	6,68E-05

Al igual que para el análisis de la piezometría, se dibujó mediante el software Modflow la distribución espacial de la conductividad hidráulica en el Jardín (Fig. 53), obteniéndose que ésta aumenta hacia los piezómetros S12 y S18, alrededor de los cuales sigue una distribución concéntrica disminuyendo hacia la zona centro-oeste del Jardín.

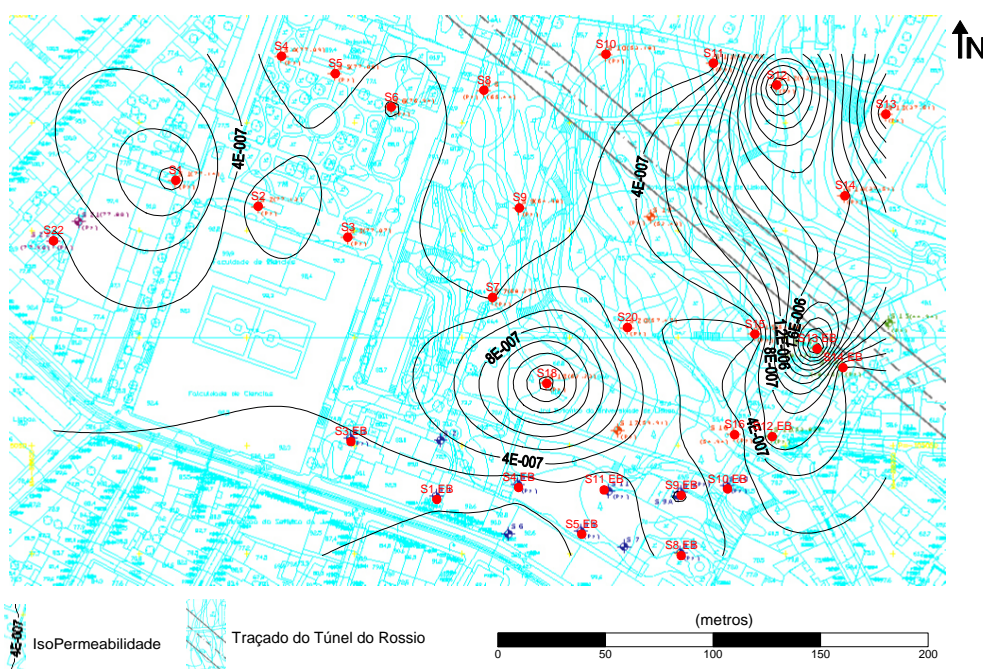


Figura 53.- Distribución espacial de la conductividad hidráulica (en m/s) obtenida por “Kriking” con base en los ensayos “Slug Test” efectuados en los piezómetros del Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa (Adaptado del software Modflow, 2015).

El cálculo de la transmisividad también es importante para definir las características hidrológicas del acuífero, ya que corresponde a su capacidad para transmitir agua en todo su espesor saturado. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T = K \times b$$

Donde K corresponde a la conductividad hidráulica que se acaba de determinar y b al espesor saturado del acuífero, obtenido gráficamente para cada piezómetro a través del análisis de los perfiles geológicos interpretativos realizados por Grandewater en 2011 (Anexos VII y VIII).

Los valores de transmisividad obtenidos en cada piezómetro y su media aritmética se presentan a continuación.

Tabla 20.- Transmisividad calculada para cada piezómetro y respectiva media aritmética.

Piezómetros	Conductividad hidráulica (m/s)	Espesor saturado (m)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)
<b>S4</b>	1,08E-07	7,75	0,072
<b>S5</b>	6,08E-08	8,35	0,044
<b>S6</b>	4,39E-07	9,55	0,362
<b>S8</b>	5,57E-08	6,23	0,030
<b>S12</b>	3,08E-06	8,46	2,251
<b>S13</b>	1,62E-07	3,08	0,043
<b>S15</b>	1,12E-07	7,87	0,076
<b>S18</b>	1,75E-06	9,07	1,371
<b>S20</b>	2,40E-07	8,53	0,177
<b>Media</b>	6,68E-07		<b>0,492</b>

La capacidad del acuífero para transmitir el agua subterránea en su espesor saturado es clasificada como muy baja (Custodio, E. y Llamas, M.R., 1983).

Mediante el análisis de estos dos parámetros hidrogeológicos del acuífero – transmisividad y conductividad hidráulica o permeabilidad – se puede concluir que el potencial hidrogeológico del Jardín no presenta una gran aptitud para la implantación de captaciones de agua subterránea para el riego del mismo.

De acuerdo con todos los parámetros obtenidos es posible definir para el área del Jardín Botánico de Lisboa el siguiente modelo hidrogeológico conceptual:

- No se trata de un acuífero de acuerdo con la terminología hidrogeológica, sino de un acuitardo, por las formaciones geológicas que lo constituyen, esencialmente arcillas y margas de elevada compacidad, la cual aumentará, como es de esperar, con la profundidad.



- Su permeabilidad y transmisividad son clasificadas como bajas-muy bajas, típicas de formaciones arcillosas que presentan una elevada porosidad total (microporosidad) pero una baja porosidad efectiva (Tablas 19 y 20).
- El nivel freático se encuentra próximo del contacto entre la formación superficial de deposición más reciente y las formaciones Micénicas subyacentes (Anexo VIII).
- La recarga de las formaciones Micénicas de interés depende fundamentalmente de la precipitación en las zonas altas del área de estudio y será mínima debido a la ocupación del suelo con estructuras impermeables. También se juntará eventualmente a las precipitaciones el agua procedente de los retornos del riego de los espacios verdes envolventes (Jardín del Príncipe Real, Parque Mayer y el propio Jardín Botánico) y de fugas de la red de abastecimiento para consumo humano (Grandewater, 2011). El sistema responderá lentamente a los eventuales episodios de precipitación, como se puede observar en los gráficos de los Anexos V y VI, que representan la dependencia de la variación del nivel piezométrico con la precipitación atmosférica, estudiada mediante la instalación de transductores de presión en los piezómetros S4 y S12. Esto se debe al bajo coeficiente de infiltración que presenta el acuífero, provocado por los también bajos parámetros de permeabilidad y transmisividad.
- La escorrentía subterránea tiene un sentido aproximado W-E, acompañando a la topografía en dirección a la Avenida da Liberdade, y el gradiente hidráulico es bajo (aproximadamente 0,16) (Fig. 19).

De este modelo conceptual hidrogeológico resulta que las formaciones del Micénico no presentan aptitud para la implantación de un pozo de captación de agua subterránea. Por ello, para conseguir una solución de captación subterránea para satisfacer las necesidades de agua para el riego del Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa, se procede a evaluar el potencial hidrogeológico de la secuencia litológica existente en profundidad (Fig. 54).

En el pasado, se llevó a cabo un pozo de búsqueda de agua subterránea de 150 m de profundidad que permitió reconocer la existencia de una singularidad geológica asociada al Complejo Volcánico de Lisboa del tipo filón o chimenea volcánica con eventuales intercalaciones volcánico-sedimentarias de edad Neocretácica. Desde el punto de vista hidrogeológico, esta formación se reveló como improductiva para la implantación de captaciones de agua subterránea (Silva, M.C.R. y Medeiros, A., 2011).

Como se puede observar en la figura 54, la secuencia litológica continúa en profundidad con calcáreos cristalizados con rudistas y calcáreos apiñados con *Neolobites vibrayeanus* del Cretácico Superior. La experiencia adquirida permite concluir que esta formación presenta un potencial hidrogeológico interesante. Sin

embargo, la posición muy próxima de la superficie de esta unidad en la zona del Jardín Botánico podrá implicar que se encuentre drenada y, por tanto, que sea improductiva.

A medida que aumenta la profundidad, se encuentran calcáreos margosos y margas del Cretácico Medio, que pueden alcanzar un espesor de varias centenas de metros, y gres con cantos rodados y calcáreos del Cretácico Inferior. Estas formaciones no fueron alcanzadas por el pozo de búsqueda, por lo que se consultarán los estudios existentes en zonas de geología similar para evaluar su potencial hidrogeológico.

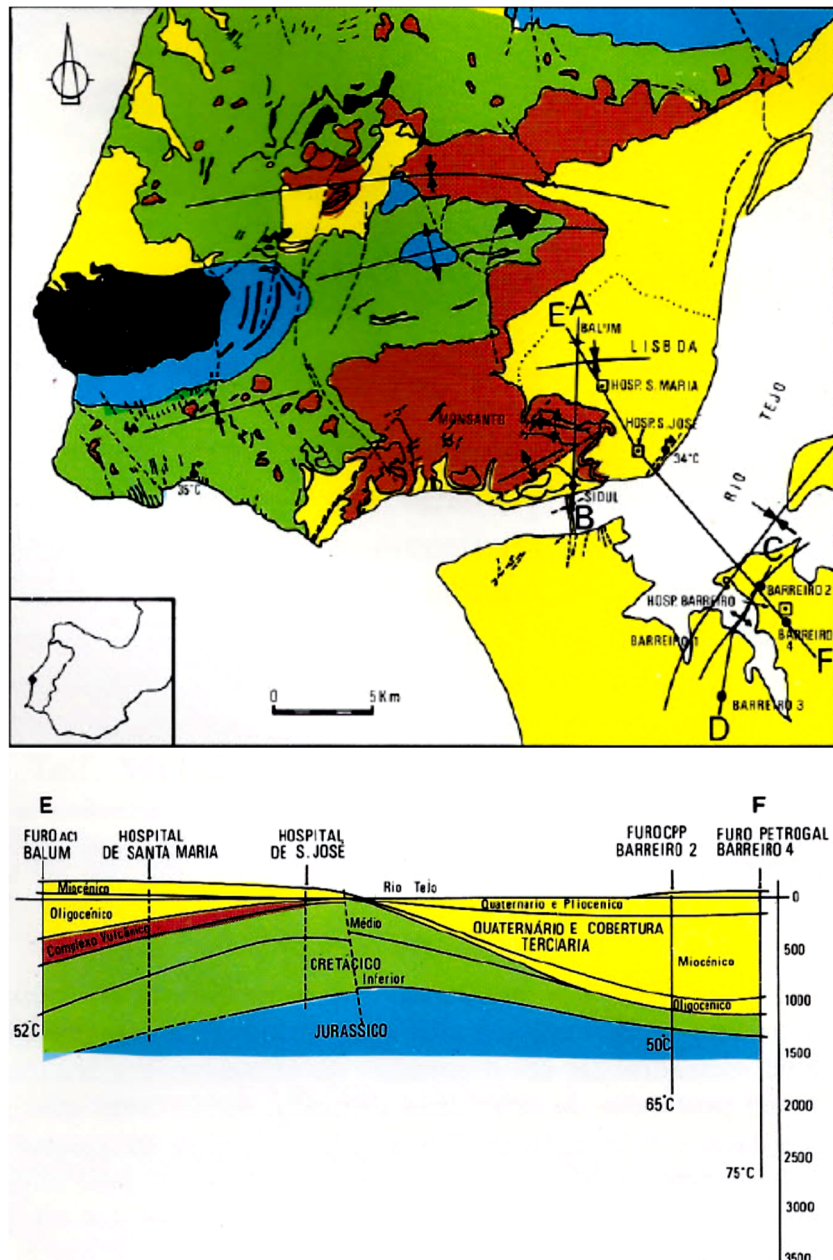


Figura 54.- Geología de la región de Lisboa (Adaptado de Grandewater, 2011). El Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa se encuentra cerca del Hospital de San José. Se puede observar que el Cretácico Superior se encuentra muy cerca de la superficie en esta zona.

De los estudios consultados (Rectoría de la Universidad de Lisboa, 2015), resultan los siguientes escenarios posibles:

Tabla 21.- Potencial hidrogeológico, profundidad esperada de búsqueda y riesgo de fallo para la captación de agua subterránea en el Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa.

Unidades litoestratigráficas		Litologías dominantes	Potencial hidrogeológico (L/s)	Profundidad esperada para la búsqueda (m)	Riesgo de fallo
Terciario	Micénico	Arcillas, limos, margas e intercalaciones carbonatadas	0	-	Total
	Complejo Volcánico de Lisboa	Rocas volcánicas (basaltos y brechas)	1	-	Elevado
Cretácico	Cretácico Superior	Calcáreos apiñados con <i>Neolobites vibrayeanus</i>	5	100 a 120	Elevado
	Cretácico Medio	Calcáreos margosos e margas	5	180 a 200	Medio a Elevado
	Cretácico Inferior	Gres con cantos rodados y calcáreos	15	450 a 500	Medio

Relativamente a los caudales de recuperación del acuífero tras episodios de bombeo, lo que se verificó a través de estudios efectuados en la zona envolvente al Jardín (Fig. 56) es que su valor es muy bajo, siendo registrado un valor de  $0,0623 \pm 0,001$  L/s en la galería-mina del Parque Mayer y un valor medio de 0,118 L/s tras tres sesiones de bombeo en el pozo del Salitre (Fig. 55) (Pinto, M.J., 2014).

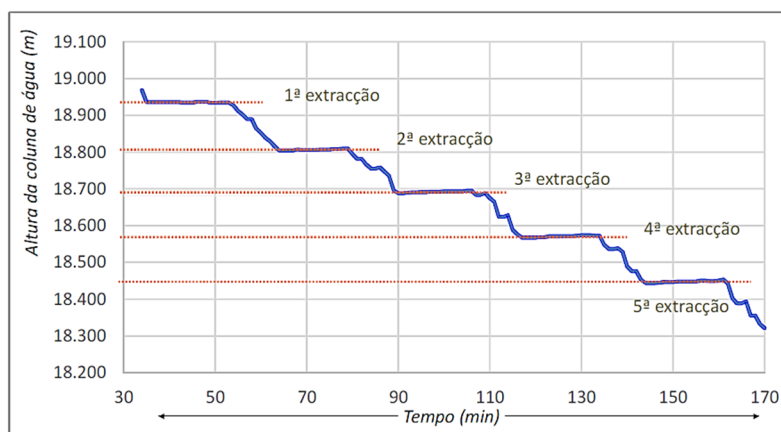


Figura 55.- Gráfico de la columna de agua registrado por el transductor de presión a lo largo de las 5 extracciones efectuadas durante la primera sesión de bombeo en el pozo del Salitre (Adaptado de Pinto, M.J., 2014). Como se puede observar, la recuperación del nivel de agua es prácticamente nula.

Otro estudio fue efectuado en la Cisterna-Mayor, situada en las inmediaciones del Jardín Botánico, para evaluar su estanqueidad y estimar los caudales de recarga. La importancia de esta cisterna se debe a que podría ser aprovechada como punto de retención y almacenamiento tanto de su recarga natural (precipitación atmosférica e infiltraciones de agua subterránea) como del excedente de agua subterránea que podría



obtenerse mediante captaciones en el Jardín para la posterior utilización de este volumen de agua en el riego del Jardín. Sin embargo, los valores obtenidos de caudales de recarga tras sesiones de bombeo fueron muy bajos, del orden de los 0,0024 L/s en período seco y 0,0027 L/s en período húmedo (Pinto, M.J., 2014). A estos bajos valores de caudales de recarga se junta la baja pluviosidad, principal responsable de la recarga de la cisterna, y la pérdida de estanqueidad a partir de los 2,9 m de columna de agua.

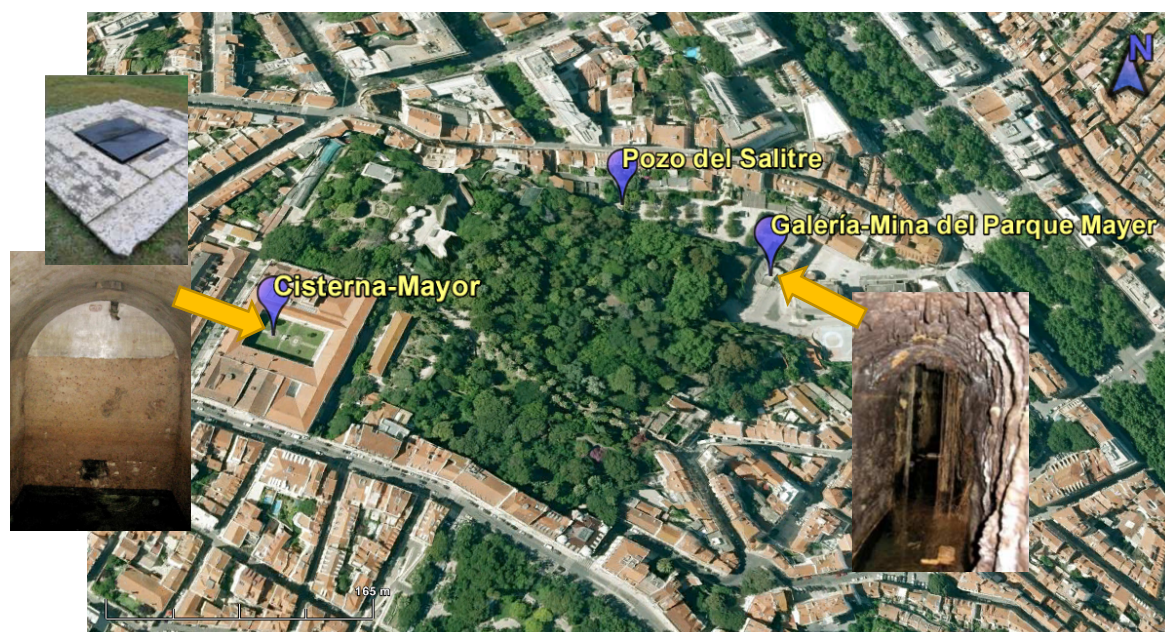


Figura 56.- Situación geográfica de los locales de estudio de los caudales de recuperación del acuífero en la zona envolvente al Jardín Botánico (Pozo del Salitre, Galería-Mina del Parque Mayer y Cisterna-Mayor).

Tras todos los análisis efectuados, se puede concluir que el potencial hidrogeológico del Jardín es muy bajo, revelando su inaptitud para la instalación de captaciones de agua subterránea que permitan obtener los volúmenes necesarios para satisfacer la demanda de regadío sin inducir con ello una sobreexplotación del acuífero.

## 8. Conclusiones y alternativas

Con base en la caracterización hidrogeológica, se puede verificar que en la zona de estudio no se encuentra un acuífero reconocido como tal según la terminología hidrogeológica, tratándose realmente de un acuitardo semiconfinado debido a la existencia de formaciones geológicas (limos, arcillas y margas principalmente) que, a pesar de contener cantidades apreciables de agua, la transmiten muy lentamente. Esto se debe a su microporosidad, presentando una porosidad total alta pero una porosidad efectiva baja, lo que implica la obtención de parámetros de permeabilidad e infiltración muy bajos que causan que se deba estudiar detenidamente la aptitud del acuífero para la implementación de captaciones.

De acuerdo con los estudios realizados por las empresas Grandewater y Geotest en 2011, la escorrentía subterránea es lenta y la recarga depende básicamente de la precipitación, siendo el área de recarga mínima por tratarse de un área fuertemente urbanizada e impermeabilizada que ha sufrido más procesos de impermeabilización con la pavimentación de varios puntos del Jardín. Este hecho causa la baja disponibilidad hídrica del local y, con ello, el débil potencial para el aprovechamiento del agua subterránea para el riego del Jardín. Otro aspecto a tener en cuenta es el hecho de que parte del agua de lluvia se pierde por evapotranspiración, lo que unido a que la litología de las formaciones no es muy favorable a la infiltración, provoca un gran problema en términos de recarga del acuífero.

Analizando los valores de precipitación de 2015 y su influencia en la variación del nivel hidrostático mediante la instalación de transductores de presión en los piezómetros S4 y S12, se puede concluir que la infiltración del agua pluvial en el acuífero es muy reducida, aumentando aproximadamente 0,5 m la cota del nivel del agua en el piezómetro S4 y 0,25 m en el piezómetro S12 pasados 1-2 días del episodio de mayor precipitación del período de tiempo analizado.

De acuerdo con los sondeos efectuados por Geotest en 2011, que ofrecen las profundidades de las diferentes formaciones geológicas, y con los niveles piezométricos obtenidos en campo en Marzo del presente año, la superficie freática o superficie libre del agua es detectada en el contacto entre el nivel superior más reciente, constituido esencialmente por una componente areno-arcillosa con fragmentos líticos y restos cerámicos, y las formaciones subyacentes de edad Micénica, constituidas por arcilla con fragmentos de naturaleza carbonatada y arcillas margosas con restos de fósiles. La piezometría, como se podía observar en el mapa de isopiezas obtenido mediante el software Modflow, presenta un sentido de flujo subterráneo aproximadamente W-E acompañando a la topografía en dirección a la Avenida da Liberdade, variando las cotas piezométricas entre +72 m al Oeste y cerca de +23 m al Este del Jardín. En lo que se refiere a la conductividad hidráulica (K), se obtuvo un valor medio de  $6,68 \times 10^{-7}$  m/s en los ensayos de permeabilidad “Slug Test”

efectuados por Geotest, valor típico de formaciones de baja permeabilidad, como es el caso de las formaciones arcillosas del área de estudio.

Por otro lado, los bajos valores de transmisividad calculados (valor medio de 0,492 m<sup>2</sup>/día) y los bajos caudales de recuperación determinados en los estudios realizados en 2014 en la zona envolvente al Jardín (0,0623 L/s en la Galería-Mina del Parque Mayer, 0,118 L/s en el Pozo del Salitre y 0,0024 y 0,0027 L/s en la Cisterna-Mayor en los períodos seco y húmedo, respectivamente), permiten concluir el bajo aprovechamiento posible del agua disponible en estas formaciones. Al extraer un determinado volumen para el riego del Jardín se verifica que el acuitardo presenta valores de recarga muy inferiores a la explotación a la que está sometido, es decir, en poco tiempo puede inducirse la sobreexplotación del mismo. Todo esto resulta en un bajo potencial hidrogeológico del Jardín. La existencia de la Cisterna-Mayor podría ser una solución de aprovechamiento conjunto de las aguas superficial y subterránea almacenadas con el volumen de agua que se extraería del acuitardo, pero ésta también presenta caudales de recarga muy bajos y problemas de estanqueidad (sólo es capaz de almacenar agua hasta los 2,9 m de columna de agua).

Con respecto a la calidad del agua subterránea, con base en los diagramas obtenidos del U.S. Salinity Laboratory Staff, Piper y Stiff y a partir de las normativas portuguesas consultadas (Decreto-Ley 236/98 para la aptitud del agua para el riego y Decreto-Ley 306/07 para consumo humano), se puede concluir que el agua no es apta para uso doméstico pero sí para el riego del Jardín, a pesar de presentar un riesgo de salinidad medio-alto, es decir, a pesar de tener una concentración de sales minerales disueltas elevada, aspecto que se materializa en el diagrama del U.S. Salinity Laboratory Staff (agua con un nivel de salinidad C2-C3) y en los elevados valores de conductividad eléctrica obtenidos en campo. Estos valores sugieren influencia de contaminación en las aguas subterráneas por tratarse de un área fuertemente urbanizada que sufre infiltración de efluentes domésticos e industriales, así como infiltración de aguas pluviales y de limpieza de pavimentos que a su vez transportan sustancias contaminantes que se encuentran en la superficie. Estas aguas podrán ser utilizadas para el riego siempre que las plantas existentes en el Jardín Botánico puedan tolerar los niveles de salinidad presentados. Por su parte, la calidad del agua subterránea para consumo humano es únicamente apta en una de las muestras, la recogida en el piezómetro S18, principalmente como consecuencia de las elevadas concentraciones de los cationes Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> y, con ello, de valores de dureza superiores al límite fijado por la normativa.

En resumen, aun existiendo la posibilidad de usar el agua subterránea para el riego de las plantas que resistan los elevados valores de salinidad, los bajos caudales de recarga del acuífero inviabilizan su explotación para el riego del Jardín sin inducir con ello una sobreexplotación del mismo. Por esta razón será preciso llevar a cabo estudios alternativos más pormenorizados que, a pesar de su elevado coste, podrían aportar un beneficio económico a la Rectoría de la Universidad de Lisboa a largo



plazo. A continuación se presentan los posibles programas y estudios alternativos que se podrían llevar a cabo en el futuro:

Por un lado, el aumento progresivo de los volúmenes de agua utilizados para el riego del Jardín Botánico durante el período de 2008-2013 lo establece como un excelente campo de aplicación de **programas encaminados al ahorro de agua**. El regadío, debido a la gran cantidad de agua que demanda, es el principal objetivo de estos programas, ya que cantidades proporcionalmente pequeñas significan, en términos absolutos, volúmenes importantes. Para lograr estos objetivos de ahorro de agua surgen los programas de modernización de los regadíos y, en general, los denominados Programas Integrados de Gestión de la Demanda o Programas de Ahorro de Agua, que persiguen la realización de una serie de actividades orientadas a reducir la demanda de agua y a mejorar la eficiencia en el uso del recurso. El principal objetivo que se debería alcanzar con este programa es minimizar el uso de los recursos hídricos, ya que el agua es un recurso natural escaso e irremplazable, mediante políticas que consigan satisfacer las demandas con un menor consumo de los recursos, manteniendo la calidad y regularidad del servicio. Para lograr este objetivo se deben contemplar una serie de intervenciones que favorezcan los cambios de hábitos en el uso del agua, la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos hídricos disponibles y la previsión de utilizar otros recursos alternativos a los habituales. Estas intervenciones serían las siguientes:

- **Medidas de gestión**, para disminuir los consumos de agua sin necesidad de intervenciones técnicas en los sistemas de suministro, mediante la **concienciación de los usuarios** de que pueden obtener un mismo nivel de calidad en el riego consumiendo menos agua.
- **Medidas de eficiencia**, para reducir los consumos de agua mediante la introducción de modificaciones técnicas en los equipos y dispositivos de consumo. Se podrían llevar a cabo, por ejemplo, las siguientes actividades:
  - **Minimización del problema de los retornos** en el uso agrícola, ya que debido a las grandes cantidades de agua que se manejan, a las pérdidas por infiltración en el terreno y a la ineficiencia o antigüedad de las redes de riego, el valor de los retornos de agua en los regadíos es mucho menor que en cualquier otro uso del agua (valor medio de un 20%). Este problema se puede solucionar mediante la implantación de nuevos sistemas de riego más sofisticados y eficientes, como los **riegos localizados por goteo** que, a pesar de su elevado coste, aportan un gran beneficio económico disminuyendo considerablemente los volúmenes de agua consumidos y aumentando la eficiencia en el uso del recurso, distribuyendo el agua mediante goteros directamente en la zona de influencia de las raíces de las plantas.

Otra posible solución sería la implantación de **redes de drenaje desarrolladas** que absorban los excesos de agua, tanto pluviales como procedentes de la red de distribución del riego, y permitan su reutilización. Esta red podría ser instalada aprovechando el marcado relieve y elevadas pendientes del Jardín, en la zona de valle, formando una canalización abierta, un lago o un depósito (el lago sería la mejor solución a nivel visual) que permitiese almacenar el excedente de agua y su posterior reutilización.

- Otra alternativa a llevar a cabo sería un estudio de **detección y eliminación de las fugas** en las redes de distribución doméstica e industrial para disminuir la concentración de sales disueltas en las aguas subterráneas y, con ello, disminuir su conductividad eléctrica y aumentar su calidad.
- **Medidas de sustitución**, para sustituir el recurso hídrico que se esté utilizando por otros recursos que supongan una economía en el sistema. Por ejemplo:
  - **Reutilización de los efluentes urbanos** con tratamiento previo para satisfacer la demanda agrícola del Jardín:  
El campo de aplicación por excelencia en la reutilización de las aguas residuales urbanas con un tratamiento previo no necesariamente muy intensivo es su aprovechamiento agrario, debido al alto contenido de elementos nutritivos en dichas aguas, resultando un alto poder fertilizante. Esta solución consistiría en depurar el agua residual generada en los núcleos urbanizados envolventes al Jardín y transportarla aguas abajo para satisfacer la demanda existente. El principal inconveniente de esta alternativa es la elevada inversión necesaria para las obras de transporte y conducción del agua, lo que supondría que, aunque se trate de una técnica desarrollada e innovadora, no sea siempre factible.
  - **Utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas**, mediante la instalación del depósito de almacenamiento del excedente de agua en la zona de valle del Jardín o mediante el aprovechamiento de la existencia de la Cisterna-Mayor. Ambas alternativas permitirían por un lado el almacenamiento del agua procedente de las precipitaciones atmosféricas, de los retornos del riego y, mediante la implantación de una red de drenaje (rejillas) radial, de la máxima cantidad de agua subterránea que pudiese infiltrarse de acuerdo con los impedimentos litológicos del acuífero y, por otro lado, su reutilización para el riego del Jardín, al menos durante las épocas de sequía.

A continuación se presentan otras propuestas de estudios alternativos más pormenorizados que sería interesante llevar a cabo en el futuro:

- Estudio sobre las posibles vías de **mejora de la calidad del agua subterránea**, ya que para consumo humano en un caso de extrema necesidad se podría utilizar como solución de abastecimiento, pues el agua estudiada únicamente presenta una inadecuada aptitud para uso doméstico como consecuencia de las elevadas concentraciones de los cationes calcio y magnesio y, con ello, de valores de dureza superiores al límite fijado por la normativa. Este sistema de depuración y potabilización supondría una inversión estatal muy elevada pero cualquier inversión destinada a la potabilización de agua es siempre rentable, ya que nunca se sabe cuándo se va a necesitar y no se le puede asignar un precio a la vida humana.

Principalmente, se debería estudiar la posibilidad de mejorar totalmente la calidad del agua subterránea para uso doméstico mediante la **utilización de ablandadores**. El agua estudiada es dura, es decir, contiene más minerales de calcio y magnesio que un agua normal y, como consecuencia, disuelve otros iones cargados positivamente con menos facilidad. En el proceso de potabilización del agua su grado de dureza es muy importante, pues un agua dura puede atascar las tuberías debido a la deposición de cal y complica la disolución de detergentes, disminuyendo la eficiencia de todo el sistema. La mejor solución sería la utilización de una unidad de ablandamiento tras la red de captación del agua subterránea posible de extraer del acuífero y su conexión directa con la red de suministro de agua. Los ablandadores consistirán en intercambiadores iónicos que reemplazarían los iones de calcio y magnesio causantes de la dureza del agua por otros iones, generalmente sodio y potasio, añadidos mediante un tanque que contiene sales de sodio y potasio (NaCl y KCl). Este proceso no precisa generalmente de inversiones muy elevadas (coste de 0,20-0,40 €/día), presenta la ventaja de que los ablandadores tienen una larga vida útil (alrededor de 80 años) y podría mejorar totalmente la calidad del agua subterránea para su uso doméstico.

- Por otro lado, el principal estudio que se debería llevar a cabo en el Jardín sería sobre el cálculo de los **caudales mínimo y máximo** de agua subterránea que se podrían llegar a extraer, sin inducir con ello la sobreexplotación del acuífero, para posteriormente estudiar la posibilidad de satisfacer la demanda de riego en invierno con el caudal mínimo y en verano con el máximo.
- Otra posible solución para satisfacer la demanda de riego y mejorar la calidad del agua subterránea sería la implantación en superficie de **colectores del agua pluvial** para evitar su infiltración en el acuífero arrastrando consigo contaminantes que aumentan la conductividad eléctrica del agua. El agua superficial almacenada por los colectores podría utilizarse para el riego conjuntamente con el caudal mínimo de agua subterránea posible de captar sin inducir sobreexplotación.

- Concienciación de los usuarios para la utilización de **fertilizantes orgánicos** en lugar de químicos, posibilitando con ello la obtención de un agua subterránea con mejor calidad mediante la disminución de las concentraciones de los cationes que se presentan en exceso (calcio y magnesio) y, con ello, el ablandamiento del agua.
- En el caso de conseguir mejorar la calidad del agua subterránea hasta los niveles mínimos exigidos para que sea apta para su uso doméstico, mediante las medidas de utilización de fertilizantes orgánicos, unidades de ablandamiento y la implantación de los colectores del agua superficial, sería interesante llevar a cabo un estudio sobre la utilización del caudal mínimo posible, para no inducir la sobreexplotación del acuífero, para abastecer la red doméstica del Museo del Jardín, obteniendo como resultado un **Jardín autosuficiente**.
- Otra solución podría ser la de realizar un **riego selectivo**, es decir, aunque el caudal obtenido en las captaciones no sea suficiente para satisfacer la demanda de regadío en su totalidad, puede ser suficiente para satisfacer el riego de un área del Jardín. También en este campo sería aconsejable la realización de un estudio de selección de las plantas del Jardín capaces de soportar los niveles de salinidad del agua subterránea, para poder evaluar la necesidad de mejorar la calidad de la misma en este aspecto.
- A parte de todas estas alternativas, sería conveniente realizar un **estudio climatológico en el área de estudio con un mayor período de retorno** (al menos de 10 años), para poder realizar esta caracterización de manera más pormenorizada y, con ello, evaluar los niveles piezométricos máximos y mínimos que se podrían llegar a alcanzar en cada piezómetro. Para ello, la Rectoría de la Universidad de Lisboa podría evaluar la posibilidad de destinar un pequeño presupuesto a una empresa privada que disponga de datos de precipitaciones en la zona del Jardín con la precisión y exactitud requeridas para el estudio.

Todas estas alternativas precisarían de elevadas inversiones para llevarse a cabo, pero podrían aportar un gran beneficio económico al Jardín Botánico de la Universidad de Lisboa a largo plazo, permitiendo satisfacer la demanda de riego o incluso la demanda doméstica del Museo adscrito al Jardín mediante alternativas desarrolladas e innovadoras.

## 9. Referencias bibliográficas

Balairón Pérez, L. (2010). *Gestión de Recursos Hídricos* (Segunda ed.). Barcelona, Cataluña, España: Ediciones UPC.

Barradas, J. (1992). *Geoquímica de Elementos Maiores e Vestigiais em Amostras de Solo, Sedimentos de Vala e Águas Subterrâneas. Contribuição para a Caracterização Ambiental da Zona Envolvente ao Complexo de Estarreja. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro*. Aveiro, Portugal.

Cox, C. (2006). *Tutorial de Aquachem*. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Obtenido de [http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro\\_MOD5/Tutorial%20AQUACHEM.pdf](http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro_MOD5/Tutorial%20AQUACHEM.pdf)

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda ed., Vol. I y II). Barcelona, España: Editorial Omega.

Dahllöf, I., Svensson, O., & Torstensson, C. (1997). *Optimizing the determination of nitrate and phosphate in sea water with ion chromatography using experimental design*. Journal of Chromatography A, 771, 163-168.

Datos Climáticos Europeos. (2015). Recuperado el 2 de Julio de 2015, de Clima en Lisboa, Portugal: <http://www.climatedata.eu/climate.php?loc=pox0039&lang=es>

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL). (2015). *Protocolos do Laboratório de Análise de Águas*.

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. (2015). Recuperado el 10 de Julio de 2015, de Espectroscopia de Absorção Atómica de Chama: <http://www.dq.fct.unl.pt/servicos-externos/espectroscopia-de-absorcao-atmica-de-chama>

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. (2015). Recuperado el 10 de Julio de 2015, de Cromatografia Iónica: <http://www.dq.fct.unl.pt/servicos-externos/cromatografia-ionica>

Facultad de Artes y Ciencias de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Departamento de Biología. (2015). Recuperado el 1 de Junio de 2015, de Manual de Ecología Microbiana. Parámetros Físico-Químicos. Alcalinidad: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-alcalinidad.pdf>

Fosalba, C., Goyenola, G., Iglesias, C., Meerhoff, M., & Mazzeo, N. (Agosto de 2007). *Eutrofización de ecosistemas acuáticos: causas, consecuencias y estrategias de conservación y rehabilitación. Determinación de la alcalinidad total*. Recuperado el 1 de Junio de 2015, de [http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/alcalinidad.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/alcalinidad.pdf)

Fundação Francisco Manuel dos Santos. PORDATA - Base de Dados Portugal Contemporâneo. (26 de Junio de 2015). Recuperado el 2 de Julio de 2015, de Precipitação total em Portugal. Fontes: Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA/MAM): <http://www.pordata.pt/Portugal/Precipitação+total-1070>

Geotest. (2010). *Limiasur S.A. (Lisboa). Estudo Geológico e Geotécnico. Relatório*. Lisboa.

Geotest & Grandewater. (2011). *Limiasur S.A. Príncipe Real e Rua da Alegria (Lisboa). Estudo Hidrogeológico. Relatório Final 2011/01/28/01*. Lisboa.

Harvey, D. (2015). *Ion-Exchange Chromatography*. Greencastle: DePauw University. Obtenido de [http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical\\_Chemistry/Analytical\\_Chemistry\\_2.0/12\\_Chromatographic\\_and\\_Electrophoretic\\_Methods/12F%3A\\_Other\\_Forms\\_of\\_Liquid\\_Chromatography](http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.0/12_Chromatographic_and_Electrophoretic_Methods/12F%3A_Other_Forms_of_Liquid_Chromatography)

Hem, J. D. (1985). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. Alexandria, USA: U.S. Geological Survey.

Hidroprojecto. (2003). *Ficope/Lisbobracara. Estudo Hidrogeológico da Área do Parque Mayer/Jardim Botânico. Relatório da 1ª Fase - Estudos Preliminares*. Lisboa.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2015). *La composición química de las aguas subterráneas naturales*. Obtenido de [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1\\_1.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/1_1.pdf)

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA/MAM). (2014). Recuperado el 2 de Julio de 2015, de Boletins Climatológicos Anuais de 2003-2014 de Portugal Continental: [http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20150127/jaWbvpqLKYsXxPvTfaAW/cli\\_20140101\\_20141231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20150127/jaWbvpqLKYsXxPvTfaAW/cli_20140101_20141231_pcl_aa_co_pt.pdf)

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA/MAM). (2015). Recuperado el 2 de Julio de 2015, de Boletins Climatológicos Mensais de 2015 de Portugal Continental: <http://www.ipma.pt/pt/publicacoes/boletins.jsp?cmbDep=cli&cmbTema=bpm&cmbAno=2012&idDep=cli&idTema=&curAno=-1>

Lenntech. (2015). *Water Treatment. Tratamiento y purificación del agua*. Recuperado el 21 de Julio de 2015, de Cuestiones sobre dureza y ablandamiento del agua: <http://www.lenntech.es/procesos/ablandamiento/preguntas-mas-frecuentes/faq-ablandamiento-agua.htm>

Lloyd, J. W., & Heathcote, J. A. (1985). *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater*. Oxford, England: Clarendon Press.

López-Ruiz, B. (2000). *Advances in the determination of inorganic anions by ion chromatography*. Madrid, Spain: Journal of Chromatography A, 881, 607-627.



Marcó, J. (2015). *Química del Agua*. Recuperado el 15 de Marzo de 2015, de El Análisis del Agua. Conceptos Básicos: <http://www.quimicadelagua.com/Analisis.html>

Mendes, B., & Oliveira, J. (2004). *Qualidade da Água para Consumo Humano*. Lisboa: Edición Lidel.

Ministério do Ambiente, Decreto-Ley Nº 236/98, de 1 de Agosto, Diário da República – I Série-A, Nº 176, Imprensa Nacional – Casa da Moeda, Lisboa, que establece las normas, criterios y objetivos de calidad del agua, mediante el establecimiento de valores máximos recomendables y admisibles; parcialmente revocado por el Decreto-Ley Nº 243/01, de 5 de Septiembre, Diário da República – I Série-A, Nº 206 – y por el Decreto-Ley Nº 306/07, de 27 de Agosto, Diário da República – I Série, Nº 164.

Moitinho de Almeida, F. (1986). *1ª Edición de la Hoja 4 de la Carta Geológica del Municipio de Lisboa en la escala 1:10.000*. Servicios Geológicos de Portugal, Lisboa.

Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC). (2013-2015). *Mais Botânico. Página dedicada a melhorar o Jardim Botânico de Lisboa*. Obtenido de <http://maisbotanico.blogspot.pt/>

OMEGA. Your One-Stop Source for Process Measurement & Control. (2015). Recuperado el 10 de Julio de 2015, de Introduction to Pressure Transducers and Transmitters: <http://www.omega.com/prodinfo/pressuretransducers.html>

OoCities. (2015). *Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas*. Recuperado el 17 de Junio de 2015, de Parámetros y Características de las Aguas Naturales: <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>

Pais, J. (1981). *Contribuição para o conhecimento da vegetação Miocénica da parte ocidental da bacia do Tejo. Dissertação de Doutoramento*. Universidade Nova de Lisboa.

Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J. L., Legoinha, P., Machado, S., . . . Falé, P. (2006). *Noticia Explicativa de la 2ª Edición de la Hoja 34-D (Lisboa) de la Carta Geológica de Portugal en la escala 1:50.000*. Instituto Nacional de Ingeniería, Tecnología e Innovación, Departamento de Geología, Lisboa.

Pavón Chocano, A. B. (2003). *Proyecto Fin de Carrera - Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz. Anejo IV: Análisis del agua*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Universidad de Castilla - La Mancha. Obtenido de [http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Proyectos/AntonioPavon/06-AnejoIV.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Proyectos/AntonioPavon/06-AnejoIV.pdf)

Peinado Guevara, H. J., Green Ruiz, C. R., Herrera Barrientos, J., Escolero Fuentes, O. A., Delgado Rodríguez, O., Belmonte Jiménez, S. I., & Ladrón de Guevara, M. A. (2011). *Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera*. Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México (UNAM). Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v21n1/v21n1a6.pdf>

Pinto, M. J. (2014). *Ensaio de Caudal no Poço do Salitre. Relatório interno*. Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC).

Pinto, M. J. (2014). *Monitorização da Cisterna-Maior. Relatório interno*. Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC).

Pinto, M. J. (2014). *O ciclo da água no Jardim Botânico. Folheto da acção do Programa Ciência Viva - FCT*. Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC). Obtenido de <http://www.mnhn.ul.pt/pls/portal/docs/1/472638.pdf>

Pohl, C. A., Stillian, J. R., & Jackson, P. E. (1997). *Factors controlling ion exchange selectivity in suppressed ion chromatography – Review*. Journal of Chromatography A, 789, 29-41.

Reis, C. (2015). *Monitorização da água subterrânea nas instalações do Jardim Botânico*. Museu Nacional de História Natural e da Ciência da Universidade de Lisboa (MUHNAC).

Reitoria da Universidade de Lisboa (RUL). (2015). *Consumo da água no Jardim Botânico no período de 2008-2013*. Lisboa.

Rodrigues, J. (2012). *Otimização da incerteza da determinação por cromatografia iónica da composição maioritária e vestigial de soluções salinas. Dissertação do Mestrado em Química Analítica*. Departamento de Química e Bioquímica da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Sánchez San Román, F. J. (2010). *Representación de los diagramas de Piper y Stiff*. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. Obtenido de [http://hidrologia.usal.es/Complementos/Representar\\_Piper\\_y\\_Stiff.pdf](http://hidrologia.usal.es/Complementos/Representar_Piper_y_Stiff.pdf)

Silva, C., & Medeiros, A. (2011). *Caracterização Hidrogeológica do Jardim Botânico da Universidade de Lisboa. Relatório Final 2011/07/11/01*. Reitoria da Universidade de Lisboa & Grandewater, Departamento de Geologia, Lisboa.

Smart Fertilizer Management. (2015). Recuperado el 7 de Abril de 2015, de Artículos sobre la Calidad del Agua para el Riego: <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/Water-Quality>

Soares, M. (5 de Septiembre de 2014). *Jornal Público*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de Jardim Botânico da Universidade de Lisboa agoniza à espera de obras: <http://www.publico.pt/local/noticia/jardim-botanico-da-universidade-de-lisboa-agoniza-a-espera-de-obras-1668689>

Superintendencia Nacional de Servicio de Saneamiento (Sunass). (2015). Recuperado el 1 de Junio de 2015, de Análisis del Agua. Parte 2: Alcalinidad: <http://bvs.per.paho.org/texcom/cd048437/sunassal.pdf>

Universidad de los Andes (ULA). (2015). *Capítulos V y VI.- Análisis de los Resultados Hidroquímicos del Agua, Conclusiones y Recomendaciones. Tesis de la Biblioteca de la Universidad de los Andes.* Venezuela. Obtenido de [http://tesis.ula.ve/pregrado/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=1561](http://tesis.ula.ve/pregrado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1561)

Universidad Nacional de la Plata. (2015). Recuperado el 10 de Julio de 2015, de Métodos espectroscópicos atómicos. Espectroscopia de emisión y de absorción atómica: [http://catedras.quimica.unlp.edu.ar/qa3/Clases\\_Teoricas/Absorcion\\_y\\_Emision\\_Atomicas.pdf](http://catedras.quimica.unlp.edu.ar/qa3/Clases_Teoricas/Absorcion_y_Emision_Atomicas.pdf)

Valente, M. A. (2015). *Valores de precipitación ofrecidos por la Estación Pluviométrica del Jardín Botánico durante el período de 2011-2015.* Lisboa.

Villegas, P. (2011). *Agua y SIG.* Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de Tutorial de Aquachem. Hidroquímica del agua subterránea: <http://www.aguaysig.com/2010/12/tutorial-de-aquachem-40-hidroquimica-de.html>

## ANEXOS

ANEXO I.- Diagramas de Stiff para cada una de las muestras

ANEXO II.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para consumo humano

ANEXO III.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para su uso en el riego

ANEXO IV.- Esquemas de la colocación de los transductores en los piezómetros S4 y S12

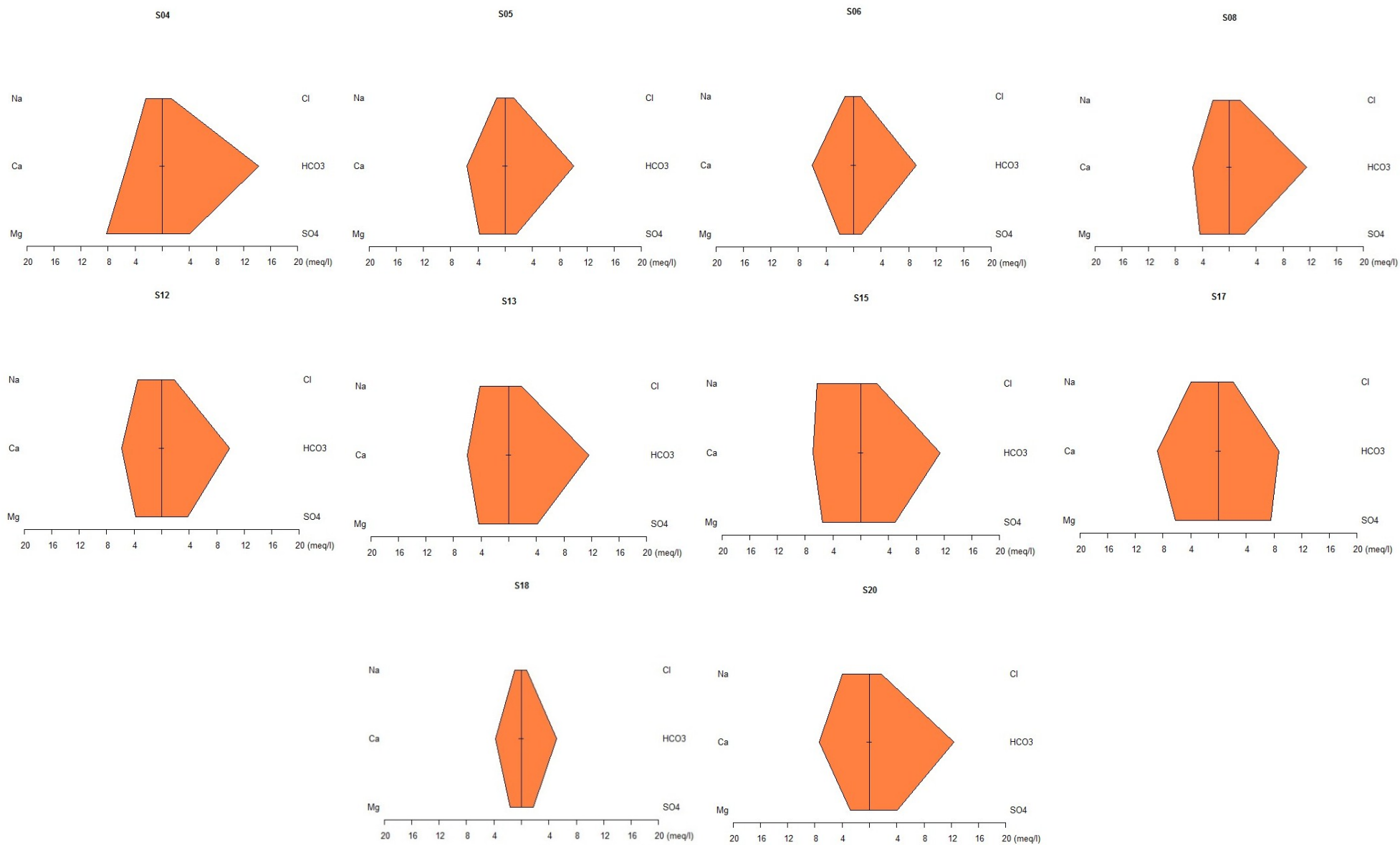
ANEXO V.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica y niveles hidrostáticos desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S4

ANEXO VI.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica y niveles hidrostáticos desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S12

ANEXO VII.- Planta de localización de los perfiles geológicos interpretativos

ANEXO VIII.- Perfiles geológicos interpretativos y representación de la superficie piezométrica

ANEXO I.- Diagramas de Stiff para cada una de las muestras obtenidas en campo en cada piezómetro (Adaptados del software Aquachem 5.1, 2015).



ANEXO II.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para consumo humano.

	Temperatura (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	Dureza (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)
VMR	12 <sup>1</sup>	-	-	-	-	10 <sup>1</sup>	-	-	-
VMA	25 <sup>1</sup>	6,5-9 <sup>3</sup>	2500 <sup>3</sup>	1500 <sup>1</sup>	150-500 <sup>3</sup>	12 <sup>1</sup>	200 <sup>3</sup>	100 <sup>3</sup>	50 <sup>3</sup>
S4	19,4	6,87	1572	786	670	1,85	54,8	104	99,56
S5	19,1	7,14	1021	510,5	470	3,46	28,3	112	46,14
S6	17,8	7,41	877,3	438,65	400	2,88	27,9	120	24,28
S8	17,8	7,01	1344	672	490	2,66	56,2	108	53,42
S12	18,2	7,16	1382	691	480	3,14	79,8	116	46,14
S13	19,7	6,99	1519	759,5	520	5	95,8	120	53,42
S15	18,2	7,11	1697	848,5	620	4,54	145,2	137,6	67,02
S17	17,5	7,51	1950	975	750	7	90,6	176	75,28
S18	16,1	7,34	575,1	287,55	270	5,94	22,9	76	19,43
S20	17,2	7,18	1457	728,5	510	1,982	91,8	148	34
	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Calidad del agua				
VMR	-	-	-	-					
VMA	250 <sup>3</sup>	1,5 <sup>3</sup>	50 <sup>3</sup>	250 <sup>3</sup>					
S4	49,25	-	0,83	195,82	Mala				
S5	45,51	0,62	0,09	78,15	Media				
S6	37,31	0,28	0,33	54	Media				
S8	60,11	-	0,88	111,31	Media				
S12	63,59	0,19	7,14	180,67	Media				
S13	66,82	0,48	0,42	201,38	Mala				
S15	82,71	-	10,65	234,92	Mala				
S17	74,6	0,95	3,94	364,86	Mala				
S18	28,13	-	0,12	86	Buena				
S20	62,06	-	-	193,05	Media				



ANEXO III.- Comparación de los resultados paramétricos obtenidos en campo y en laboratorio en las muestras de agua subterránea con los requisitos de calidad mínima que se deben garantizar para su uso en el riego.

	Temperatura (°C)	pH	CE (μS/cm)	STD (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	Calidad del agua
VMR	12 <sup>4</sup>	6,5-8,4 <sup>2</sup>	-	-	10 <sup>4</sup>	-	70 <sup>2</sup>	1 <sup>2</sup>	50 <sup>2</sup>	575 <sup>2</sup>	
VMA	25 <sup>4</sup>	4,5-9 <sup>2</sup>	2500 <sup>4</sup>	1500 <sup>4</sup>	12 <sup>4</sup>	200 <sup>4</sup>	-	15 <sup>2</sup>	-	-	
S4	19,4	6,87	1572	786	1,85	54,8	49,25	-	0,83	195,82	Buena
S5	19,1	7,14	1021	510,5	3,46	28,3	45,51	0,62	0,09	78,15	Buena
S6	17,8	7,41	877,3	438,65	2,88	27,9	37,31	0,28	0,33	54	Buena
S8	17,8	7,01	1344	672	2,66	56,2	60,11	-	0,88	111,31	Buena
S12	18,2	7,16	1382	691	3,14	79,8	63,59	0,19	7,14	180,67	Buena
S13	19,7	6,99	1519	759,5	5	95,8	66,82	0,48	0,42	201,38	Buena
S15	18,2	7,11	1697	848,5	4,54	145,2	82,71	-	10,65	234,92	Media
S17	17,5	7,51	1950	975	7	90,6	74,6	0,95	3,94	364,86	Media
S18	16,1	7,34	575,1	287,55	5,94	22,9	28,13	-	0,12	86	Buena
S20	17,2	7,18	1457	728,5	1,982	91,8	62,06	-	-	193,05	Buena

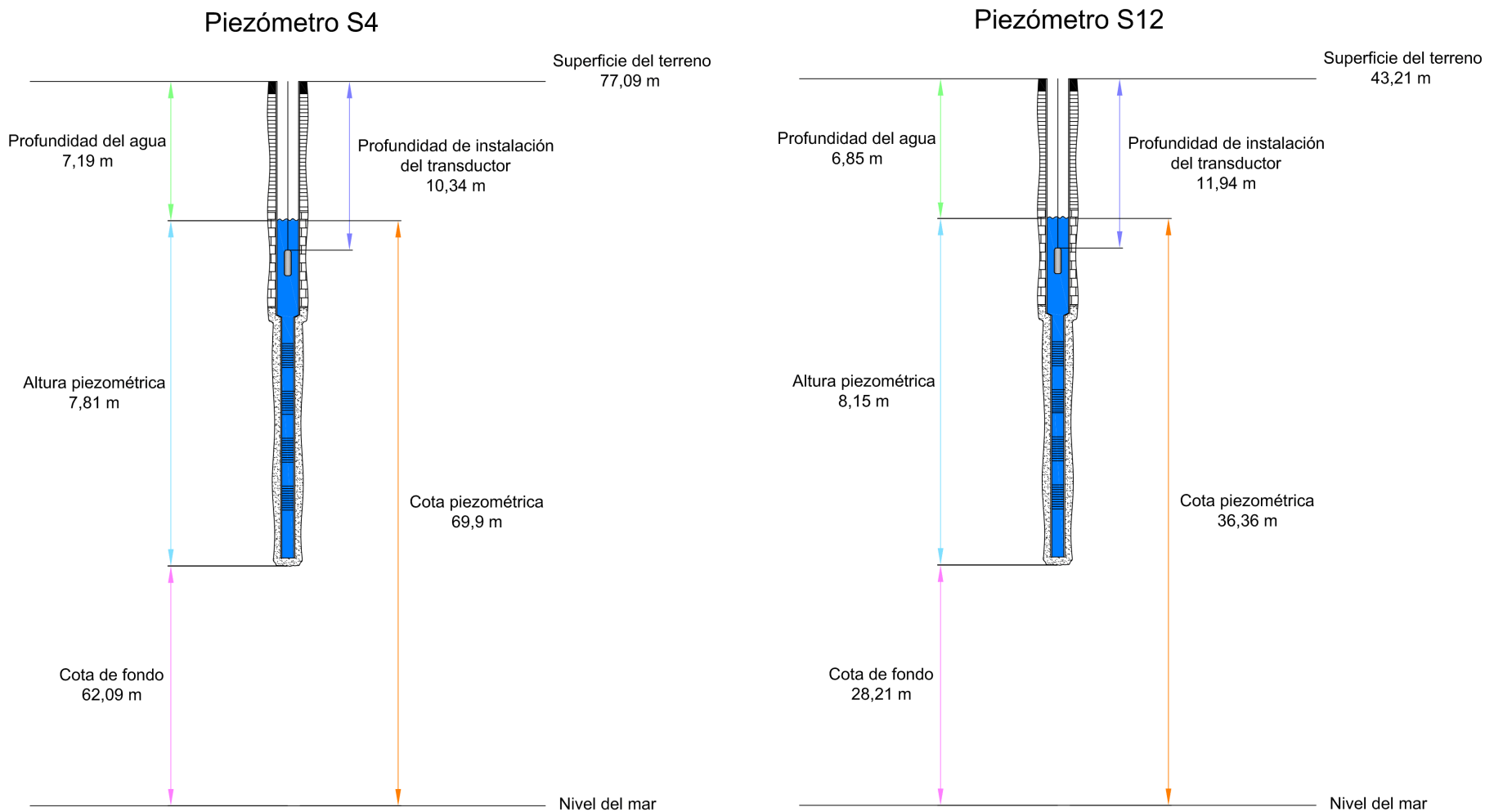
1, Adaptado del Anexo VI del Decreto-Ley 236/98, sobre la calidad del agua para consumo humano.

2, Adaptado del Anexo XVI del Decreto-Ley 236/98, sobre la calidad del agua destinada para el riego.

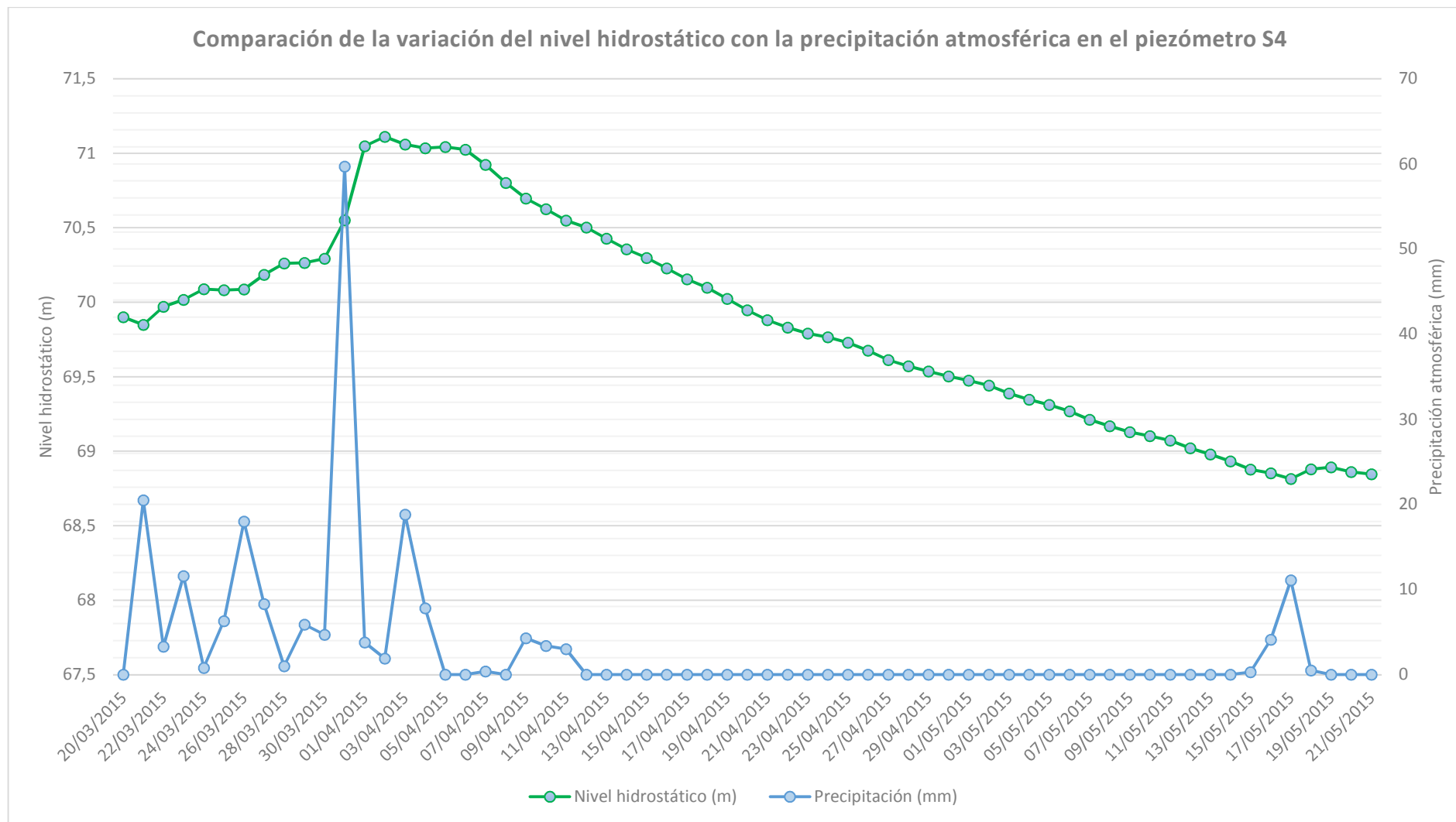
3, Adaptado del Anexo I de los Decretos-Ley 243/01 y 306/07, sobre los valores indicadores establecidos para los parámetros químicos para efectos de control de la calidad del agua destinada al consumo humano.

4, Valores adaptados de la normativa sobre la calidad del agua para consumo humano como valores de referencia, por ser el uso agrícola menos exigente en lo que a calidad del recurso se refiere.

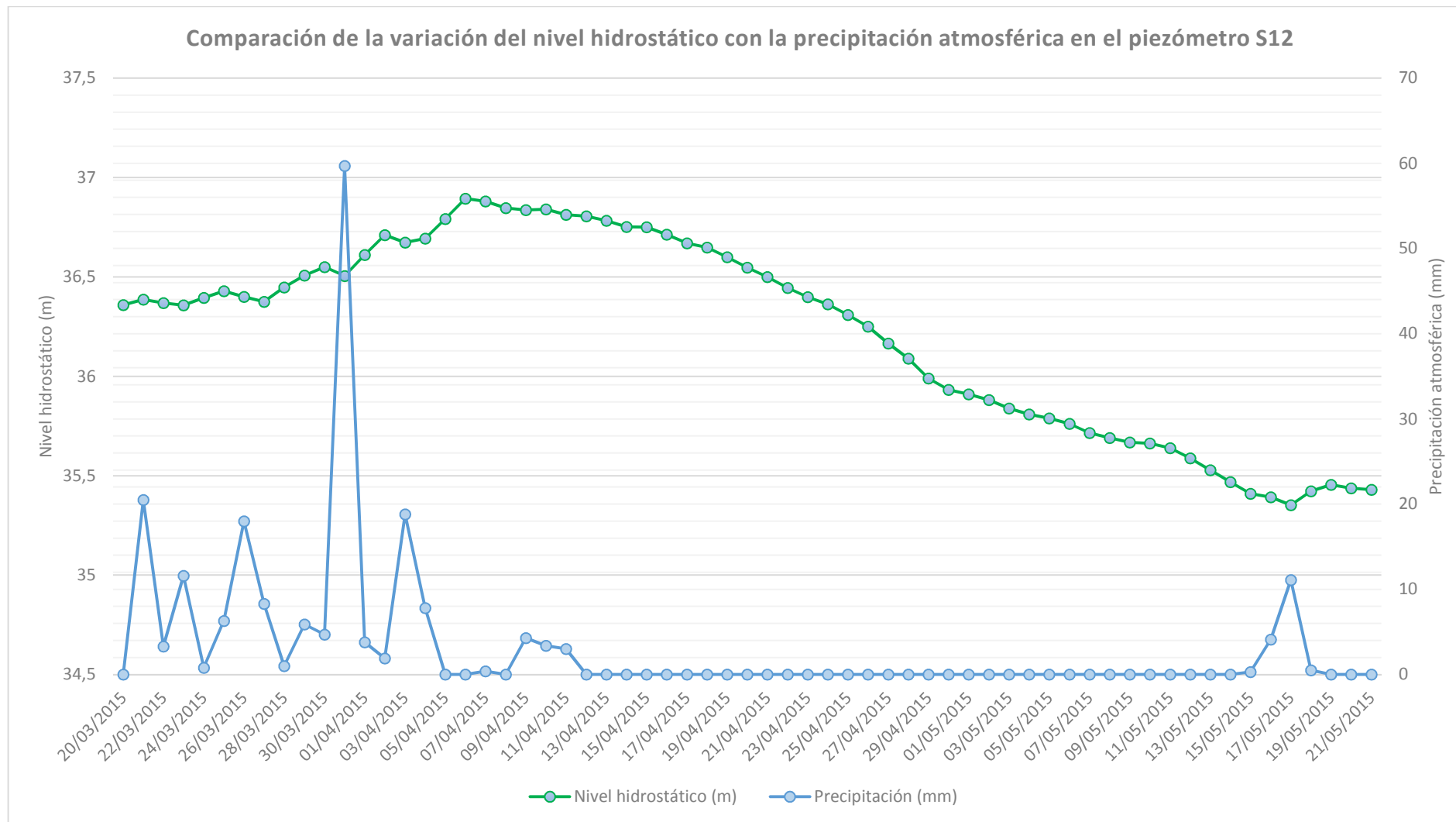
ANEXO IV.- Esquemas representativos de la colocación de los transductores en los piezómetros S4 y S12.



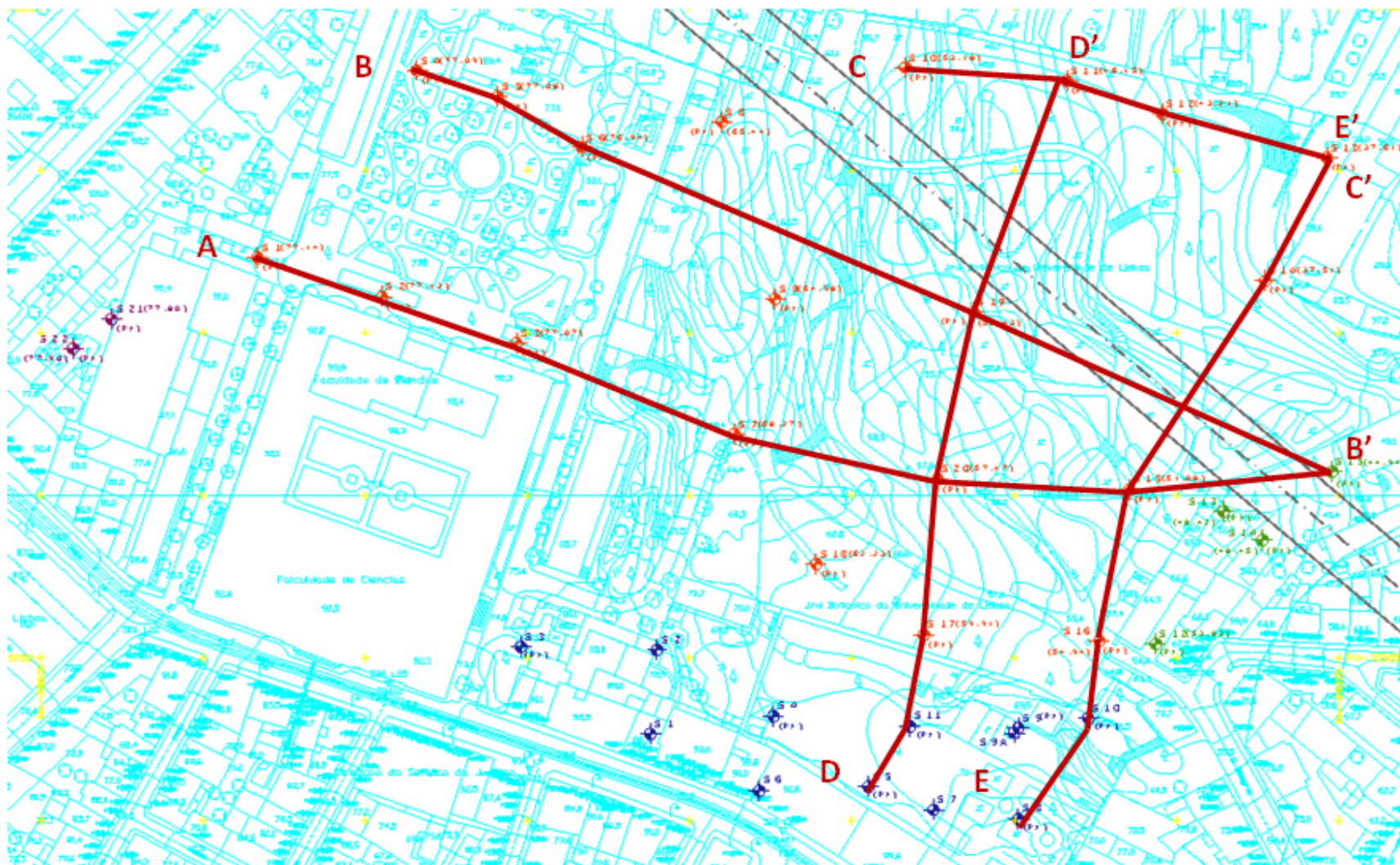
ANEXO V.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica (mm) y niveles hidrostáticos (m) desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S4.



ANEXO VI.- Representación y comparación de los valores de precipitación atmosférica (mm) y niveles hidrostáticos (m) desde el 20/03/15 hasta el 21/05/15 en el piezómetro S12.



ANEXO VII.- Planta de localización de los perfiles geológicos interpretativos (Adaptado de Grandewater, 2011).



ANEXO VIII.- Perfiles geológicos interpretativos con la representación de la superficie piezométrica (línea trazada en azul) definida por los niveles piezométricos medidos en los respectivos sondeos (Adaptado de Grandewater, 2011).

